

**IMPACTO DE LA COMUNICACIÓN ENTRE MÁQUINAS EN LA PROVISIÓN DE CALIDAD DE SERVICIO EN EL ENLACE ASCENDENTE EN REDES LTE/LTE-ADVANCED**



**Luisa Fernanda Palechor Anacona  
Miguel Ángel Tovar Freire**

**Director: Oscar Josué Calderón Cortés (FIET/UNICAUCA, Colombia)  
Co-director: Nelson Luis Saldanha da Fonseca (LRC/IC/UNICAMP, Brasil)  
Asesor: Carlos Alberto Astudillo Trujillo (LRC/IC/UNICAMP, Brasil)**

**Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones FIET  
Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT)  
Departamento de Telecomunicaciones  
2015**

**IMPACTO DE LA COMUNICACIÓN ENTRE MÁQUINAS EN LA PROVISIÓN DE CALIDAD DE SERVICIO EN EL ENLACE ASCENDENTE EN REDES LTE/LTE-ADVANCED**



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

**Luisa Fernanda Palechor Anacona  
Miguel Ángel Tovar Freire**

**Director: Oscar Josué Calderón Cortés (FIET/UNICAUCA, Colombia)  
Co-director: Nelson Luis Saldanha da Fonseca (LRC/IC/UNICAMP, Brasil)  
Asesor: Carlos Alberto Astudillo Trujillo (LRC/IC/UNICAMP, Brasil)**

**Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones FIET  
Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT)  
Departamento de Telecomunicaciones  
2015**

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>LISTADO DE ACRÓNIMOS</b> .....	<b>IV</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>1. CAPÍTULO UNO. MARCO TEÓRICO: LTE/LTE-A Y COMUNICACIONES M2M</b> .....	<b>3</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	3
1.2 ARQUITECTURA LTE/LTE-A .....	4
1.2.1 Definición de LTE .....	4
1.2.2 Arquitectura .....	4
1.3 PARTICULARIDADES DE LTE .....	9
1.3.1 Técnicas de acceso múltiple .....	9
1.3.2 Estructura de trama LTE .....	10
1.3.3 Flexibilidad en el espectro.....	11
1.3.4 Proceso de acceso aleatorio.....	11
1.3.5 Gestión de Recursos Radio (RRM).....	13
1.3.6 Marco de QoS en LTE .....	14
1.4 COMUNICACIÓN M2M.....	16
1.4.1 Definición.....	16
1.4.2 Características .....	17
1.4.3 Arquitectura y elementos clave de MTC .....	17
1.4.4 Aplicaciones .....	17
1.4.5 Clasificación del tipo de tráfico MTC.....	18
1.5 DESAFÍOS Y SOLUCIONES DE MTC SOBRE REDES LTE/LTE-A .....	18
1.5.1 Desafíos .....	18
1.5.2 Soluciones propuestas por el 3GPP .....	19
<b>2. CAPÍTULO DOS. PLANIFICACIÓN DE PAQUETES EN EL ENLACE ASCENDENTE</b> .....	<b>21</b>
2.1 INTRODUCCIÓN .....	21
2.2 PLANIFICACIÓN DE PAQUETES .....	21
2.2.1 Definición de planificación de paquetes.....	21
2.2.2 Definición de planificador de paquetes .....	21
2.2.3 Funcionamiento del planificador de paquetes .....	21
2.2.4 Planificación de paquetes en el enlace ascendente.....	22
<b>3. CAPÍTULO TRES. ALGORITMOS DE ESTIMACIÓN DE RETARDO</b> .....	<b>31</b>
3.1 INTRODUCCIÓN .....	31
3.2 ALGORITMOS DE ESTIMACIÓN DE RETARDO.....	31
3.2.1 Contexto .....	31
3.2.2 Algoritmo 1 .....	32
3.2.3 Algoritmo 2 .....	38
<b>4. CAPÍTULO CUATRO. SIMULACIÓN, RESULTADOS Y ANÁLISIS.</b> .....	<b>47</b>
4.1 INTRODUCCIÓN .....	47
4.2 SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN .....	47
4.2.1 Herramientas software para simular Redes LTE/LTE-A.....	47
4.3 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN .....	48
4.3.1 Definición de Escenarios y Casos de Simulación.....	49
4.3.2 Definición de las características de los escenarios de simulación .....	50
4.3.3 Ejecución de las simulaciones .....	52

4.4	RESULTADOS.....	54
4.4.1	Escenario 1: Acceso a la red por medio de LTE tradicional.....	54
4.4.2	Escenario 2: Acceso a la red por medio de técnica híbrida.....	60
4.4.3	Comparación de los resultados de ambos escenarios.....	65
<b>5.</b>	<b>CAPÍTULO CINCO. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS..</b>	<b>67</b>
5.1.	CONCLUSIONES.....	67
5.2.	RECOMENDACIONES.....	68
5.3.	TRABAJOS FUTUROS.....	68
<b>ANEXOS</b>	<b>.....</b>	<b>69</b>
	ANEXO A. UTILIZACIÓN DE ELEMENTOS DEL CANAL DE CONTROL.....	69
<b>REFERENCIAS</b>	<b>.....</b>	<b>71</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Arquitectura general de LTE.....	4
Figura 1.2 Pila de protocolos de la interfaz radio del sistema LTE.....	6
Figura 1.3 Comparación de la transmisión OFDMA y SC-FDMA de una serie de símbolos de datos QPSK.....	10
Figura 1.4 Estructura de la trama LTE.....	11
Figura 1.5 Anchos de banda definidos para redes LTE.....	11
Figura 1.6 Proceso de acceso aleatorio basado en contienda.....	12
Figura 1.7 Proceso de acceso aleatorio libre de contienda.....	13
Figura 1.8 Comunicaciones máquina a máquina en redes LTE/LTE-A.....	16
Figura 2.1 Funcionamiento de la PS.....	22
Figura 2.2 Proceso general de planificación de UL.....	26
Figura 2.3 Estructura del BSR. (a) Corto y (b) Largo.....	28
Figura 3.1 Ejemplo de la llegada de los paquetes y BSRs al UE y al eNB.....	32
Figura 3.2 Ejemplo de 2 pasos para la estimación de retardo del Algoritmo 1 (M=2).....	33
Figura 3.3 Diagrama de flujo del funcionamiento del Algoritmo 1.....	36
Figura 3.4 Ejemplo del funcionamiento del Algoritmo 1.....	37
Figura 3.5 Retardo estimado en los tiempos $t_0$ , $t_1$ y $t_2$ .....	39
Figura 3.6 Diagrama de flujo del Algoritmo 2.....	42
Figura 3.7 Ejemplo del Algoritmo 2.....	43
Figura 4.1 Porcentaje de paquetes perdidos mediante la técnica de acceso LTE tradicional.....	55
Figura 4.2 Retardo extremo a extremo usando la técnica de acceso LTE tradicional.....	56
Figura 4.3 Error de estimación de los Algoritmos en el escenario 1.....	59
Figura 4.4 <i>Throughput</i> agregado y utilización de los PRBs disponibles con la técnica de LTE tradicional.....	60
Figura 4.5 Porcentaje de paquetes perdidos mediante la técnica de acceso híbrida.....	61
Figura 4.6 Retardo extremo a extremo usando la técnica de acceso aleatorio híbrida.....	62
Figura 4.7 Error de estimación de los Algoritmos 1 y 2 usando la técnica de acceso híbrida.....	64
Figura 4.8 <i>Throughput</i> agregado y utilización de los PRBs disponibles con la técnica de acceso híbrida.....	65
Figura A.1 Utilización de CCEs para los dos escenarios.....	69

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1-1 Identificador de Clase de QoS para LTE .....	15
Tabla 1-2 Casos de uso M2M contemplados por los organismos de estandarización .....	18
Tabla 2-1 Ejemplos de planificadores de paquetes .....	25
Tabla 2-2 Rangos del tamaño del <i>buffer</i> para el BSR .....	28
Tabla 3-1 Notación de las variables utilizadas y sus descripciones .....	34
Tabla 4-1 Características principales de los simuladores .....	48
Tabla 4-2 Escenarios y casos de simulación .....	50
Tabla 4-3 Parámetros de simulación .....	51
Tabla 4-4 Modelo de tráfico y requerimientos de QoS .....	51
Tabla 4-5 Retardo promedio de acceso aleatorio LTE tradicional (ms) .....	57
Tabla 4-6 Percentil 95 del retardo de acceso aleatorio LTE tradicional (ms) .....	58
Tabla 4-7 Retardo promedio de acceso aleatorio híbrido (ms) .....	63
Tabla 4-8 Percentil 95 del retardo de acceso aleatorio híbrido (ms) .....	63

## LISTADO DE ACRÓNIMOS

<b>3GPP</b>	<i>Third Generation Partnership Project</i> , Proyecto Asociación de Tercera Generación
<b>AC</b>	<i>Admission Control</i> , Control de Admisión
<b>ACB</b>	<i>Access Class Barring</i> , Restricción de acceso por clase
<b>AMC</b>	<i>Adaptative Modulation and Coding</i> , Modulación y Codificación Adaptativa
<b>ARQ</b>	<i>Automatic Repeat Request</i> , Solicitudes de Repetición Automática
<b>BSR</b>	<i>Buffer Status Report</i> , Reporte de Estado del <i>Buffer</i>
<b>CCE</b>	<i>Control Channel Element</i> , Elementos del Canal de Control
<b>CA</b>	<i>Carrier Aggregation</i> , Agregación de Portadora
<b>CE</b>	<i>Control Element</i> , Elemento de Control
<b>CN</b>	<i>Core Network</i> , Núcleo de Red
<b>CoMP</b>	<i>Coordinated Multipoint</i> , Multipuntos Coordinados
<b>CP</b>	<i>Control Plane</i> , Plano de Control
<b>CQI</b>	<i>Channel Quality Indicator</i> , Indicador de la Calidad de Canal
<b>DCI</b>	<i>Downlink Control Information</i> , Información de Control de Enlace Descendente
<b>DL</b>	<i>Downlink</i> , Enlace de Bajada
<b>EAB</b>	<i>Extended Access Barring</i> , Restricción Extendida de Acceso
<b>eNB</b>	<i>Evolved Node B</i> , Nodo B Evolucionado
<b>EPC</b>	<i>Evolved Packet Core</i> , Núcleo de Paquetes Evolucionado
<b>EPS</b>	<i>Evolved Packet System</i> , Sistema de Paquetes Evolucionado
<b>E-UTRAN</b>	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i> , Red de Acceso Radio Terrestre Universal Evolucionada
<b>FD</b>	<i>Frequency Domain</i> , Dominio de la Frecuencia

<b>GBR</b>	<i>Guaranteed Bit Rate</i> , Tasa de Bit Garantizada
<b>H2H</b>	<i>Human To Human</i> , Hombre a Hombre
<b>H-ARQ</b>	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i> , Solicitud de Retransmisión Automática Híbrida
<b>HO</b>	<i>Handover</i> , Traspaso
<b>HoL</b>	<i>Head of Line</i> , Cabeza de Fila
<b>HSS</b>	<i>Home Subscriber Server</i> , Servidor de Suscriptores Locales
<b>IoT</b>	<i>Internet of Things</i> , Internet de las cosas
<b>IP</b>	<i>Internet Protocol</i> , Protocolo de Internet
<b>LB</b>	<i>Load Balancing</i> , Balanceo de Carga
<b>LCG</b>	<i>Logical Channel Group</i> , Grupo de Canales Lógicos
<b>LTE</b>	<i>Long Term Evolution</i> , Evolución a Largo Término
<b>LTE-A</b>	<i>Long Term Evolution-Advanced</i> , Evolución a Largo Término Avanzada
<b>M2M</b>	<i>Machine To Machine</i> , Máquina a Máquina
<b>MAC</b>	<i>Medium Access Control</i> , Control de Acceso al Medio
<b>MC</b>	<i>Mobility Control</i> , Control de Movilidad
<b>MCS</b>	<i>Modulation and Coding Scheme</i> , Esquema de Modulación y Codificación
<b>MME</b>	<i>Mobility Management Entity</i> , Entidad de Gestión de Movilidad
<b>MTC</b>	<i>Machine Type Communications</i> , Comunicaciones Tipo Máquina
<b>MTCD</b>	<i>Machine Type Communications Device</i> , Dispositivo MTC
<b>MTCG</b>	<i>Machine Type Communications Gateway</i> , Pasarela MTC
<b>NAS</b>	<i>Non-Access Stratum</i> , Estrato de no Acceso
<b>OFDMA</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal
<b>OSI</b>	<i>Open System Interconnection</i> , Interconexión de Sistemas Abiertos
<b>P2P</b>	<i>Peer-to-Peer</i> , Igual a Igual
<b>PC</b>	<i>Power Control</i> , Control de Potencia

<b>PDB</b>	<i>Packet Delay Budget</i> , Retardo Asignado al Paquete
<b>PDCCH</b>	<i>Physical Downlink Control Channel</i> , Canal Físico de Control de Enlace Descendente
<b>PDCP</b>	<i>Packet Data Convergence Protocol</i> , Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos
<b>PDSCH</b>	<i>Physical Downlink Shared Channel</i> , Canal Físico Compartido de Enlace de Bajada
<b>PERL</b>	<i>Packet Error Loss Rate</i> , Tasa de Pérdida de Paquetes Erróneos
<b>PF</b>	<i>Proportional Fair</i> , Proporción Justa
<b>P-GW</b>	<i>Packet Data Network Gateway</i> , Pasarela de red de Paquetes de Datos
<b>PRACH</b>	<i>Physical Random Access Channel</i> , Canal Físico de Acceso Aleatorio
<b>PRB</b>	<i>Physical Resource Block</i> , Bloque de Recurso Físico
<b>PS</b>	<i>Packet Scheduling</i> , Planificación de Paquetes
<b>PUCCH</b>	<i>Physical Uplink Control Channel</i> , Canal Físico de Control de Enlace Ascendente
<b>PUSCH</b>	<i>Physical Uplink Shared Channel</i> , Canal Físico Compartido de Enlace de Bajada
<b>QCI</b>	<i>QoS Class Identifier</i> , Identificador de Clase de Calidad de Servicio
<b>QoS</b>	<i>Quality of Service</i> , Calidad de Servicio
<b>RA</b>	<i>Random Access</i> , Acceso Aleatorio
<b>RAC</b>	<i>Radio Admission Control</i> , Control de Admisión Radio
<b>RACH</b>	<i>Random Access Channel</i> , Canal de Acceso Aleatorio
<b>RAN</b>	<i>Radio Access Network</i> , Red de Acceso Radio
<b>RAR</b>	<i>Random Access Reponse</i> , Respuesta de Acceso Aleatorio
<b>RB</b>	<i>Radio Bearer</i> , Portadora Radio
<b>RE</b>	<i>Resource Element</i> , Elemento de Recurso
<b>RLC</b>	<i>Radio Link Control</i> , Control del Enlace Radio



<b>RN</b>	<i>Relay Nodes</i> , Nodo de Retransmisión
<b>RRC</b>	<i>Radio Resource Control</i> , Control de Recursos Radio
<b>RRM</b>	<i>Radio Resource Management</i> , Gestión de Recursos Radio
<b>SAE</b>	<i>System Architecture Evolution</i> , Evolución de la Arquitectura del Sistema
<b>SC-FDMA</b>	<i>Single Carrier Division Frequency Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia con Portadora Única
<b>S-GW</b>	<i>Serving Gateway</i> , Pasarela de Servicio
<b>SR</b>	<i>Scheduling Request</i> , Solicitud de Planificación
<b>TD</b>	<i>Time Domain</i> , Dominio del Tiempo
<b>TTI</b>	<i>Transmission Time Interval</i> , Intervalo de Tiempo de Transmisión
<b>UE</b>	<i>User Equipment</i> , Equipo de Usuario
<b>UL</b>	<i>Uplink</i> , Enlace de Subida
<b>UP</b>	<i>User Plane</i> , Plano de Usuario
<b>USIM</b>	<i>Universal Subscriber Identity Module</i> , Módulo de Identificación Universal
<b>VoIP</b>	<i>Voice over Internet Protocol</i> , Voz sobre Protocolo Internet

## INTRODUCCIÓN

La evolución de la tecnología de las redes móviles hacia redes de banda ancha de Evolución a Largo Término (LTE, *Long Term Evolution*) concibió una arquitectura basada en el Protocolo Internet (IP, *Internet Protocol*) capaz de incrementar la capacidad de la red, hacer más eficiente el uso de los recursos, disminuir el retardo y aumentar la velocidad de transmisión de datos en el Enlace Ascendente (UL, *Uplink*) y en el Enlace Descendente (DL, *Downlink*) [1]–[3], además de garantizar Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*) extremo a extremo a las aplicaciones y servicios de acuerdo a sus requerimientos [4].

LTE y su evolución llamada LTE Avanzada (LTE-A, *Long Term Evolution-Advanced*)<sup>1</sup> soporta aplicaciones multimedia mediante la conmutación de paquetes como televisión digital, video en tiempo real, juegos online, etc. Sin embargo, actualmente hay nuevas necesidades para proveer nuevos servicios en áreas como, automatización industrial, redes y ciudades inteligentes, salud, etc., lo cual se traduce en dar soporte a lo que hoy se denomina Comunicaciones Tipo Máquina (MTC, *Machine Type Communications*). Las MTC se caracterizan porque gran cantidad de dispositivos autónomos están transmitiendo cada pocos milisegundos ó minutos ó incluso horas, mensajes de tamaño pequeño con una serie de requerimiento de QoS [5], [6].

LTE/LTE-A son excelentes opciones de soporte para MTC o comunicaciones Máquina a Máquina (M2M, *Machine to Machine*), como también se conoce, gracias a las características con las que cuenta, tales como soporte a movilidad, amplia cobertura y ubicuidad. No obstante, uno de los desafíos a superar es la congestión generada por el alto tráfico de señalización de los Dispositivos MTC (MTCD, *Machine Type Communications Device*) al acceder a la red, pues se espera que para el 2019 existan 3.200 millones de conexiones M2M sobre redes celulares [7].

Las métricas de planificación de paquetes usadas para la provisión de QoS en LTE se basan, entre otras, en el retardo del paquete en la Cabeza de la Fila (HoL, *Head of the Line*), el *throughput*, y la Tasa de Bit Garantizada (GBR, *Guarantee Bit Rate*) [8].

Teniendo en cuenta que la implementación de MTC en redes celulares no debe afectar la provisión de QoS a las comunicaciones tradicionales H2H (*Human-to-Human*) [9], en este trabajo se estudia el impacto de MTC sobre la garantía de la QoS en el UL de redes LTE/LTE-A mediante el HoL, ya que MTC puede aumentar el tiempo de acceso a la red provocando congestión.

Este documento se divide en cinco capítulos estructurados de la siguiente manera: El Capítulo I introduce los conceptos fundamentales y generalidades de las redes LTE/LTE-A y las comunicaciones M2M. El Capítulo II describe el proceso de planificación de paquetes en redes LTE/LTE-A. El Capítulo III presenta y describe el funcionamiento de los algoritmos de estimación de retardo implementados en este trabajo. El Capítulo IV expone

---

<sup>1</sup> En este trabajo se utilizarán las siglas LTE y LTE-A indistintamente para referirse a esos dos estándares, pues los procedimientos desarrollados son comunes a las dos tecnologías.

los escenarios de simulación, los resultados obtenidos y su respectivo análisis. Finalmente el Capítulo V presenta las conclusiones y recomendaciones obtenidas del desarrollo de todo el proyecto además de trabajos futuros en el tema.

# 1. CAPÍTULO UNO. MARCO TEÓRICO: LTE/LTE-A Y COMUNICACIONES M2M

## 1.1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha observado una demanda creciente de servicios heterogéneos a través de la red móvil, generando un aumento exponencial en el volumen de tráfico [10]. Este incremento trae consigo la necesidad de nuevas tecnologías para resolver limitaciones como: capacidad en la red de acceso móvil, simplificación de la arquitectura de red, soporte de QoS, mayor eficiencia espectral y altas velocidades de datos; lo anterior, con el fin de mejorar de forma considerable la experiencia del usuario y hacer un óptimo uso de los recursos del sistema [11].

Como solución a estos requerimientos, el Proyecto de Cooperación en sistemas de Tercera Generación (3GPP, *Third Generation Partnership Project*), a través de la especificación 8 [4], [12], [13], estandarizó la tecnología Evolución a Largo Término (LTE, *Long Term Evolution*), la cual cuenta con una combinación de eficiencia y flexibilidad espectral, mejores tasas de transmisión y recepción de datos, menor latencia en el procesamiento de señales, QoS extremo a extremo garantizada y menor consumo de potencia en el Equipo de Usuario (UE, *User Equipment*) [11], [14].

La arquitectura definida para LTE es simplificada, basada completamente en la conmutación de paquetes y diseñada para las comunicaciones Hombre a Hombre (H2H, *Human to Human*), siendo una opción de apoyo para el desarrollo de las comunicaciones inalámbricas. Con el surgimiento y desarrollo del Internet de las cosas (IoT, *Internet of Things*) una gran cantidad de nuevos dispositivos necesitarán acceso a Internet, posibilitando la creación de un sin número de nuevos servicios y aplicaciones a través de tecnologías de comunicación, principalmente inalámbricas. Esa capa de comunicación en la IoT requiere un soporte específico en la red que puede ser realizada con las denominadas comunicaciones Máquina a Máquina (M2M, *Machine To Machine*).

Los estándares de LTE/LTE-A (*Long Term Evolution-Advanced*) para redes celulares de cuarta generación son tecnologías clave para M2M gracias a la potencialidad de crecimiento en el uso de acceso celular, gran cobertura, movilidad, posibilidad del despliegue MTC en las capas físicas y de control de acceso al medio que desplaza la complejidad de los MTCDs a las estaciones base [15], [16]. No obstante, el despliegue masivo de un gran número de MTCDs plantea un nuevo conjunto de desafíos en el control de estas redes, ya que los requisitos de tráfico y servicio de las Comunicaciones Tipo Máquina (MTC, *Machine Type Communications*) difieren de las comunicaciones tradicionales H2H principalmente porque los primeros implican un gran número de dispositivos transmitiendo pequeñas cantidades de datos que frecuentemente tienen diferentes requisitos de confiabilidad y disponibilidad.

Este capítulo presenta los conceptos básicos de LTE/LTE-A, expone las funciones principales y la provisión de la QoS en estas redes. También, plantea algunas características específicas de M2M y algunos de los desafíos existentes en su operación sobre LTE/LTE-A.

## 1.2 ARQUITECTURA LTE/LTE-A

### 1.2.1 Definición de LTE

LTE es una tecnología inalámbrica de banda ancha diseñada principalmente para dar soporte al acceso constante de dispositivos móviles a Internet. Técnicamente, hace referencia a un estándar de comunicación móvil enfocado en la evolución de los sistemas de tercera generación, definiendo entre las especificaciones: baja latencia, altas velocidades de transmisión de datos sobre Protocolo de Internet (IP, *Internet Protocol*) y capacidad para soportar servicios de paquetes en tiempo real sobre múltiples tecnologías de acceso [17].

### 1.2.2 Arquitectura

La arquitectura genérica con la que cuenta el Sistema de Paquetes Evolucionado<sup>2</sup> (EPS, *Evolved Packet System*) ha sido adaptada de las diferentes familias de sistemas celulares 2G y 3G. La separación entre la Red de Acceso Radio (RAN, *Radio Access Network*), denominada Red de Acceso Radio Terrestre Universal Evolucionada (E-UTRAN, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*) y el Núcleo de Red (CN, *Core Network*), conocido como Núcleo de Paquetes Evolucionado (EPC, *Evolved Packet Core*) confiere un importante grado de flexibilidad al sistema para soportar un proceso evolutivo en el que se mejoran, agregan o sustituyen las diferentes partes de la red con la mínima afectación posible al resto de la misma [18].

La Figura 1.1 muestra la arquitectura EPS con las secciones principales: el UE, la E-UTRAN, y el EPC.

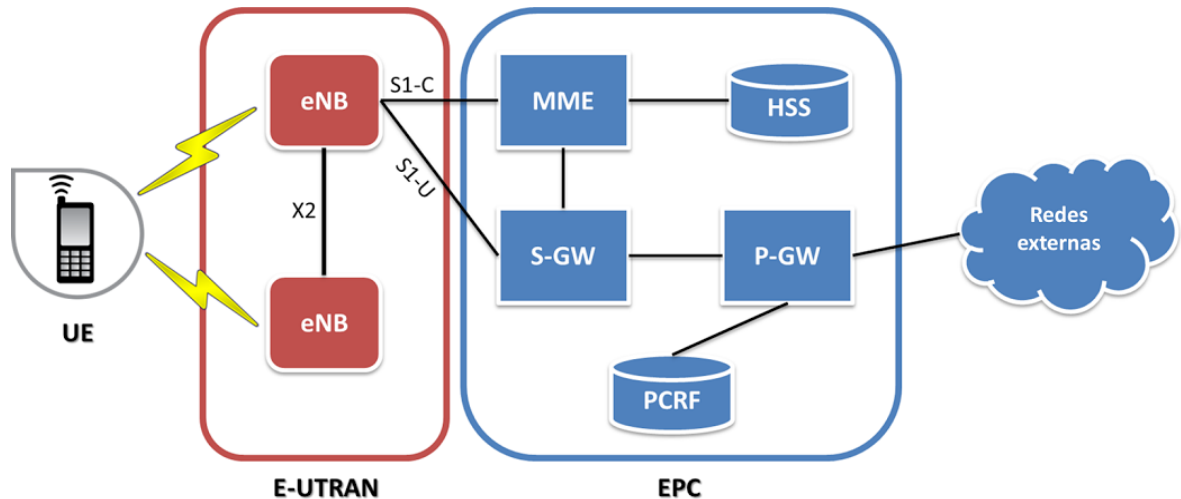


Figura 1.1 Arquitectura general de LTE. Basado en [19].

<sup>2</sup>El EPS constituye la red evolucionada de tercera generación. Es la combinación de la red de acceso E-UTRAN y el EPC.

### 1.2.2.1 Equipo de usuario

Dispositivo móvil que permite la conexión y acceso a los servicios y aplicaciones que ofrece la red. Cuenta con un Módulo de Identificación de Suscriptor Universal (USIM, *Universal Subscriber Identity Module*) que almacena información específica de cada usuario, permitiendo el reconocimiento y la autenticación del mismo. El UE cuenta también con funciones de gestión de movilidad como reporte de localización y Traspasos (HO, *Handover*) [20].

### 1.2.2.2 Red de Acceso Radio Terrestre Universal Evolucionada (E-UTRAN)

La red de acceso LTE es una red de Nodos B Evolucionados (eNB, *Evolved Node B*) la cual intercambia información de señalización y de datos de usuarios [18]. En la E-UTRAN no hay centralización de un controlador inteligente<sup>3</sup> para acelerar el establecimiento de la conexión y reducir el tiempo requerido en un HO. Además, como se observa en la Figura 1.1, los eNBs están normalmente interconectados entre ellos mediante la interfaz X2<sup>4</sup> y hacia la red central mediante la interfaz S1<sup>5</sup> [4], [21].

#### ➤ eNB

Elemento que integra todas las funcionalidades de la RAN y se encarga de proporcionar la conectividad entre el UE y el EPC, 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 Gestión de Recursos Radio (RRM, *Radio Resource Management*), encargada del control de admisión, asignación dinámica de los recursos radio, gestión de movilidad, control de interferencia entre estaciones bases y HOs de los UEs 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], [21], [22].

Un eNB está asociado a múltiples usuarios móviles, los cuales se encuentran dentro de la cobertura de su celda. Sin embargo, un UE solo puede estar conectado a un solo eNB a la vez; para que un usuario haga parte del dominio de otro eNB debe hacerlo por medio de HO.

---

<sup>3</sup>En la Red de Acceso Radio Terrestre Universal (UTRAN, *Universal Terrestrial Radio Access Network*) los controladores contienen el plano de control de la interfaz radio así como múltiples funciones del plano de usuario. Por otro lado, las estaciones base tienen la función de transmisión radio y son gestionadas de forma remota por equipos controladores [4].

<sup>4</sup>A través de esta interfaz (X2), los eNB se intercambian tanto mensajes de señalización destinados a permitir una gestión más eficiente del uso de los recursos radio así como tráfico de los usuarios del sistema cuando estos se desplazan de un eNB a otro durante un proceso de HO [4].

<sup>5</sup>El plano de usuario de esta interfaz (S1) denominado S1-U, proporciona un servicio de transferencia de datos de usuario entre eNB y una entidad del CN denominada Pasarela de Servicio (S-GW, *Serving Gateway*) sin garantías de entrega y que no soporta ni mecanismos de control de errores ni de control de flujo. El plano de control, denominado S1-MME o también S1-C, se utiliza para soportar un conjunto de funciones y procedimientos de control entre eNBs y la Entidad de Gestión de Movilidad (MME, *Mobility Management Entity*) de la red troncal.

## ➤ Interfaz Radio

La interfaz radio del sistema LTE, es una interfaz aire que permite la interconexión y el envío de tráfico y señalización entre el UE y los eNBs. Soporta básicamente tres tipos de mecanismos de transferencia de mensajes en el canal radio: difusión de señalización de control, envío de paquetes IP y transferencia de señalización de control dedicada entre un UE y el eNB [4]. Utiliza una serie de protocolos a nivel físico, de enlace y de red que transporta datos de usuario y señalización [23], como muestra la Figura 1.2.

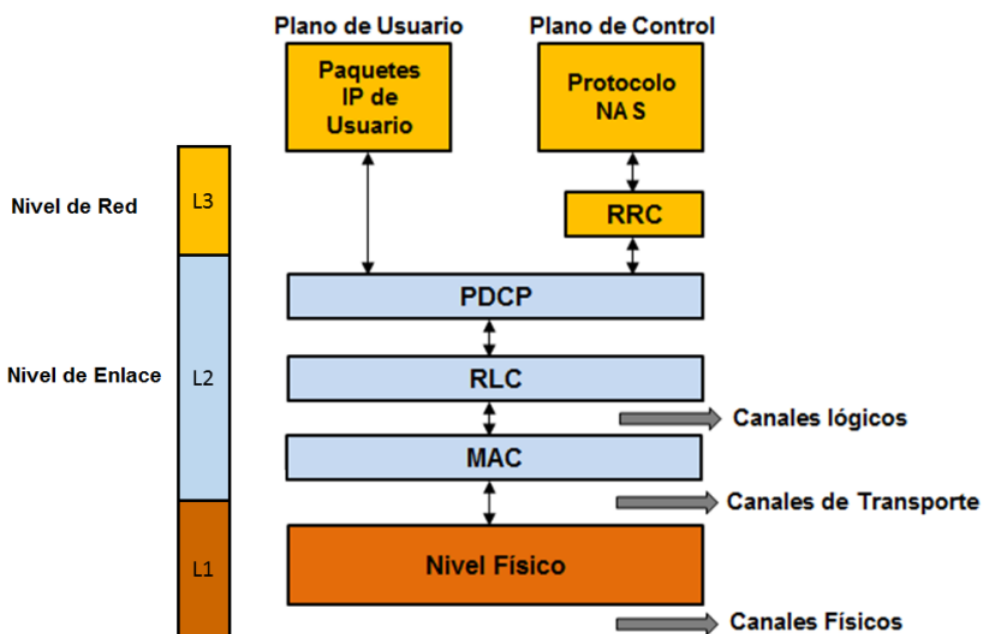


Figura 1.2 Pila de protocolos de la interfaz radio del sistema LTE. Basado en [4].

Cada nivel y subnivel de la pila de protocolos cumple unas determinadas funciones para el UP y para el CP, como se explica a continuación:

**Nivel Físico:** Se encarga de implementar las técnicas de acceso múltiple y permitir la conexión de la interfaz radio con la capa de enlace, ofreciendo los mecanismos físicos de transmisión/recepción a través del espectro radioeléctrico. Entre sus funciones principales se encuentran [21], [24]:

- ✓ Codificación y decodificación de canal.
- ✓ Modulación y demodulación.
- ✓ Implementación de técnicas de Acceso Múltiple por División de Frecuencia con Portadora Única (SC-FDMA, *Single Carrier Division Frequency Multiple Access*) en UL y Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) en DL.
- ✓ Implementación de sistemas de múltiple antena.
- ✓ Gestión adecuada de potencia en transmisión tanto para el UE como para el eNodeB.

**Nivel de Enlace:** este nivel permite el acceso a los recursos, hace la detección y corrección de errores, realiza el control de congestión y define el formato de las tramas por medio de los subniveles que lo conforman:

**Subnivel de Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos (PDCP, *Packet Data Convergence Protocol*):** sus funciones son comprimir y descomprimir las cabeceras de los paquetes IP y cifrar los mismos para mantener la integridad de la información. Añadir una cabecera de protocolo PDCP la cual contiene un número de secuencia que identifica al paquete IP para entregar de forma ordenada la información [25].

**Subnivel de Control de Enlace Radio (RLC, *Radio Link Control*):** 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, haciendo enlaces más fiables. Adicionalmente, maneja Solicitudes de Repetición Automática (ARQ, *Automatic Repeat Request*), cuya función es reenviar paquetes en caso que lleguen con errores [26].

**Subnivel Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*):** controla el acceso al canal radio por medio de la asignación de recursos a los UEs dependiendo de unas métricas preestablecidas en el eNB. Al mismo tiempo, realiza control de errores mediante la Solicitud de Retransmisión Automática Híbrida (H-ARQ, *Hybrid Automatic Repeat Request*), en la cual, en transmisión, la información se envía con redundancia y en recepción, se detectan y corrigen los errores [27]. Finalmente, selecciona el formato de transmisión para enviar los datos por la capa física [4].

Por otra parte, como muestra la Figura 1.2, la relación entre niveles y subniveles se da con diferentes tipos de canales, así: los canales lógicos se encuentran entre la RLC y la MAC y su función es caracterizar el tipo de información en datos de usuario y/o señalización que se transmite por medio de la interfaz radio. Los canales de transporte se establecen entre la MAC y la capa física, multiplexan diversos canales lógicos y describen cómo y con qué características se transmite la información a través de la interfaz radio. Finalmente, los canales físicos describen mecanismos de transmisión y recepción por medio del enlace radio para el usuario y la señalización del sistema [4]. Estos últimos establecen dónde se transmiten los bits de las subportadoras y se usan para transmitir información que se origina en las capas superiores a la física [28]. Los canales físicos que se presentan a continuación son los de UL, debido a que el estudio del proyecto es realizado en este enlace:

- ✓ Canal Físico de Acceso Aleatorio (PRACH, *Physical Random Access Channel*): Es utilizado por el UE para enviar un preámbulo<sup>6</sup> que tiene como función iniciar el proceso de conexión al sistema [4].
- ✓ Canal Físico de Enlace Ascendente Compartido (PUSCH, *Physical Uplink Shared Channel*): Este canal se utiliza para transportar la información de usuario, mensajes de señalización de Control de Recursos Radio (RRC,

---

<sup>6</sup>El preámbulo es una secuencia de códigos enviado como primer mensaje en el proceso de conexión a la red radio.



*Radio Resource Control*), información de control de UL y datos de aplicación.

- ✓ Canal Físico de Control de Enlace Ascendente (PUCCH, *Physical Uplink Control Channel*): Su función es transmitir información de control incluyendo reportes del Indicador de Calidad del Canal (CQI, *Channel Quality Indicator*), mensajes ACK/NACK, H-ARQ y Peticiones de Planificación (SR, *Scheduling Request*) de UL. Este canal nunca transmite simultáneamente con el PUSCH [29].

**Nivel de Red:** Está conformada por la entidad de RRC la cual establece, libera o modifica una Portadora Radio<sup>7</sup> (RB, *Radio Bearer*); gestiona los HOs de usuarios entre el eNB y el UE [4], [12]; y transporta mensajes que llevan información de movilidad desde y hacia el usuario.

La RRC maneja la señalización del protocolo de Estrato de No Acceso (NAS, *Non-Access Stratum*) como muestra la Figura 1.2, el cual se encarga de la autenticación, autorización, gestión de movilidad de los terminales y gestión de las RBs de la red.

### 1.2.2.3 Núcleo de Paquetes Evolucionada (EPC)

El EPC es el responsable de controlar la sobrecarga del UE, establecer las RBs y gestionar la interoperabilidad con otras redes asociadas y no asociadas al estándar [17]. Las entidades principales del EPC son [4]:

➤ **Puerta de Enlace a la Red de Paquetes de Datos (P-GW, *Packet Data Network Gateway*)**

Entidad encargada de conectar la red LTE con las redes externas, gestionar la movilidad y asignar direcciones IP a los UEs, cumplir requerimientos de QoS de las sesiones de datos y realizar un control de tarificación a las RBs que tenga asignadas un terminal.

➤ **Puerta de Enlace de Servicio (S-GW, *Serving Gateway*)**

Pasarela entre la E-UTRAN y el EPC, se encarga de hacer el enrutamiento de los datos de usuario, gestión de movilidad con otras redes de acceso 3GPP y almacenamiento temporal de los paquetes IP de los usuarios en caso que los terminales se encuentren en estado inactivo.

➤ **Entidad de Gestión de Movilidad (MME, *Mobility Management Entity*)**

La MME es el nodo de control que procesa la señalización entre el UE y el EPC. Sus principales funciones son: establecimiento, mantenimiento y liberación de las RBs, establecimiento de la conexión y la seguridad entre la red y el UE, y HO de llamadas de voz a redes 3GPP [17].

---

<sup>7</sup>Una RB es el servicio de transferencia de paquetes IP entre el eNB y un UE.

### ➤ **Servidor de Suscriptores Locales (HSS, *Home Subscriber Server*)**

Es la base de datos principal del sistema LTE, almacena y administra los datos de suscripción de los usuarios (perfil del usuario), así como información necesaria para la operación correcta de la red. Es consultada y modificada desde las diferentes entidades de red como la MME. Entre la información almacenada en el HSS se destacan: identificadores universales del usuario, identificadores de servicio, información de seguridad y cifrado, datos de localización del usuario en la red e información necesaria para la provisión de los servicios de acuerdo con las condiciones establecidas en el contrato de suscripción.

Las tres entidades, P-GW, S-GW y MME, junto con la base de datos principal del sistema, HSS, constituyen los elementos básicos para la provisión del servicio entre los UEs que acceden a través de E-UTRAN y redes externas a las que se conecta el EPC.

Con la finalización del Release 8 de LTE, el 3GPP estudió la manera de evolucionar las redes móviles para el futuro, con el fin de aprovechar la tecnología existente y asegurar que LTE continuara siendo el estándar líder global para banda ancha móvil. Es así, que posteriormente en los releases 10 y 11 el grupo de estandarización definió la tecnología denominada LTE-A [17].

LTE-A se basa en LTE y soporta hasta cinco veces más ancho de banda a través de una técnica llamada Agregación de Portadora (CA, *Carrier Aggregation*) la cual agrega de dos a cinco canales con iguales o diferentes anchos de banda y frecuencias [30], [31]. Adicionalmente, esta tecnología de red introduce un nuevo mecanismo para mejorar el *throughput* en los bordes de la celda denominado Multipuntos Coordinados (CoMP, *Coordinated Multipoint*). Este se caracteriza porque múltiples antenas de varias celdas son utilizadas para recibir y enviar señales desde y hacia un mismo UE mejorando la calidad de la señal de UL y DL entre el UE y el eNB. Por último, la arquitectura de LTE-A es la misma que la de LTE, salvo que en la RAN se agrega el uso de los denominados Nodos de Retransmisión (RN, *Relay Node*), los cuales procesan la señal antes de reenviarla involucrando operaciones de capa uno, dos o tres que permiten incrementar la cobertura, el rendimiento y la capacidad de la red [30].

## **1.3 PARTICULARIDADES DE LTE**

### **1.3.1 Técnicas de acceso múltiple**

La red LTE utiliza dos técnicas de acceso múltiple, OFDMA para DL y SC-FDMA para UL, tal y como ilustra la Figura 1.3.

OFDMA es una técnica de acceso multiusuario que subdivide el ancho de banda disponible en varias subportadoras ortogonales de banda estrecha requiriendo alto consumo de energía en el emisor. De acuerdo con la Figura 1.3a, en OFDMA los símbolos se transmiten en paralelo comportándose como una señal multiportadora.

Por otro lado, en SC-FDMA los símbolos se transmiten en serie simulando una portadora simple, lo cual hace que la señal tenga menor consumo de potencia y sea adecuada para el UL [18].

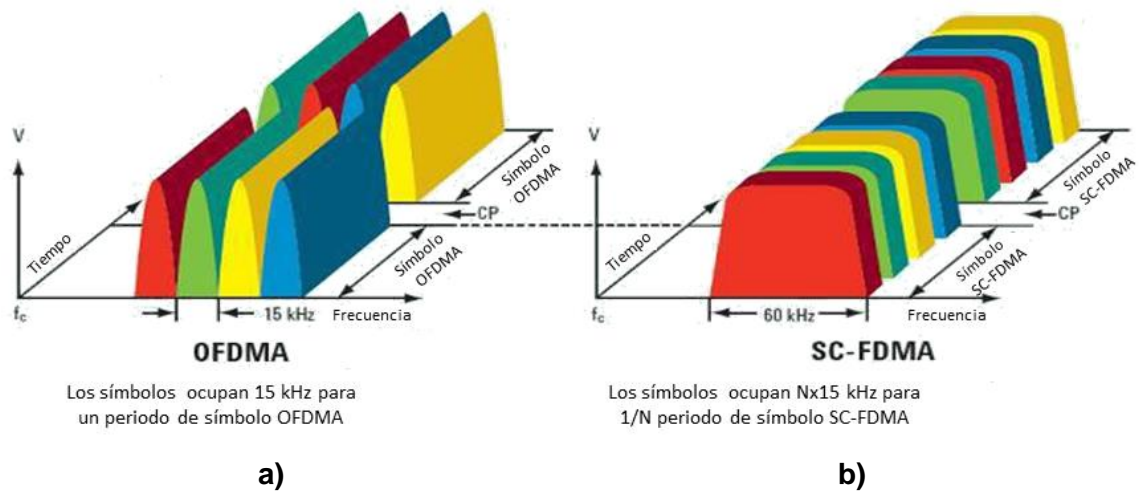


Figura 1.3 Comparación de la transmisión OFDMA y SC-FDMA de una serie de símbolos de datos QPSK. Basada en [32].

### 1.3.2 Estructura de trama LTE

Los recursos que se usan en LTE poseen dimensiones en el Dominio del Tiempo (TD, *Time Domain*) y en el Dominio de la Frecuencia (FD, *Frequency Domain*) como se presenta en la Figura 1.4. En el TD los recursos físicos están divididos en tramas<sup>8</sup> de 10 ms, las cuales están subdivididas en subtramas de 1 ms. Cada subtrama está compuesta por dos intervalos de 0.5 ms, para un total en la trama de 20 intervalos de tiempo (*slots*).

En el FD los recursos son agrupados en unidades de 12 subportadoras separadas cada 15 kHz, ocupando en total 180 kHz [13]. La unidad básica de información que el eNB puede asignar a un usuario es un Bloque de Recurso Físico (PRB, *Physical Resource Block*), el cual está conformado por un ancho de banda de 180 kHz, y 6 o 7 símbolos OFDM como muestra la Figura 1.4.

La unidad de recurso más pequeña se denomina Elemento de Recurso (RE, *Resource Element*) que ocupa un símbolo OFDM en el TD y una subportadora en el FD [17].

<sup>8</sup>Una trama es la unidad de envío de datos formada por una serie sucesiva de bits, organizados en forma cíclica, que transportan información y permiten extraerlos en recepción.

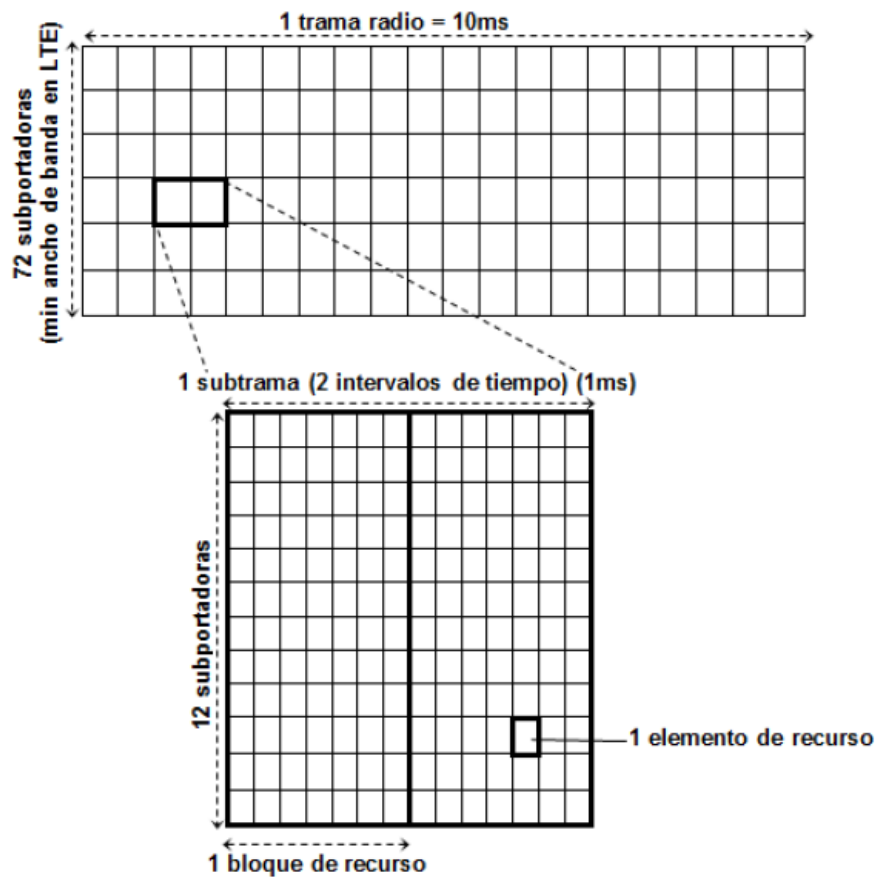


Figura 1.4 Estructura de la trama LTE. Tomada de [17].

### 1.3.3 Flexibilidad en el espectro

Para la transmisión de los flujos de tráfico, LTE puede trabajar con diferentes anchos de banda. Según las especificaciones del servicio opera desde 1.4 MHz hasta 20 MHz, para los cuales se asignan diferentes PRBs como se muestra en la Figura 1.5.

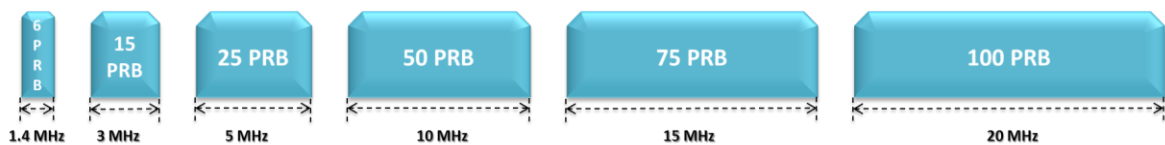


Figura 1.5 Anchos de banda definidos para redes LTE. Basado en [3].

### 1.3.4 Proceso de acceso aleatorio

LTE utiliza en UL el Canal de Acceso Aleatorio (RACH, *Random Access Channel*) en los siguientes casos: acceso por primera vez a la red, recuperación de fallos en el enlace radio, sincronización de UL, HO y envío de mensajes de Solicitud de Planificación (SR, *Scheduling Request*) pidiendo al eNB recursos de transmisión.

El procedimiento de Acceso Aleatorio (RA, *Random Access*) se presenta en dos formas: basado en contienda y libre de contienda. El primero aplica para todos los casos anteriormente nombrados y el segundo para HO donde el retardo es crucial [17].

El procedimiento basado en contienda se explica en los siguientes 4 pasos [33]–[35] y se muestra en la Figura 1-6:

En el paso 1, el equipo terminal selecciona una de las secuencias de preámbulo (msg1) proporcionadas por el eNB y la transmite en UL utilizando el PRACH. En este paso, es posible que múltiples dispositivos transmitan simultáneamente y que ocurran colisiones<sup>9</sup> en el proceso.

En el paso 2, una vez el eNB recibe un preámbulo de RA, el eNB transmite por difusión un mensaje de Respuesta de Acceso Aleatorio (RAR, *Random Access Reponse*) (msg 2) indicando el *grant*<sup>10</sup> de UL para transmitir el siguiente mensaje e información de sincronización de UL. Si el equipo terminal no recibe la respuesta dentro de una ventana de tiempo configurado, el intento de acceso se considera fallido, y debe retransmitir el preámbulo en un tiempo de backoff<sup>11</sup>.

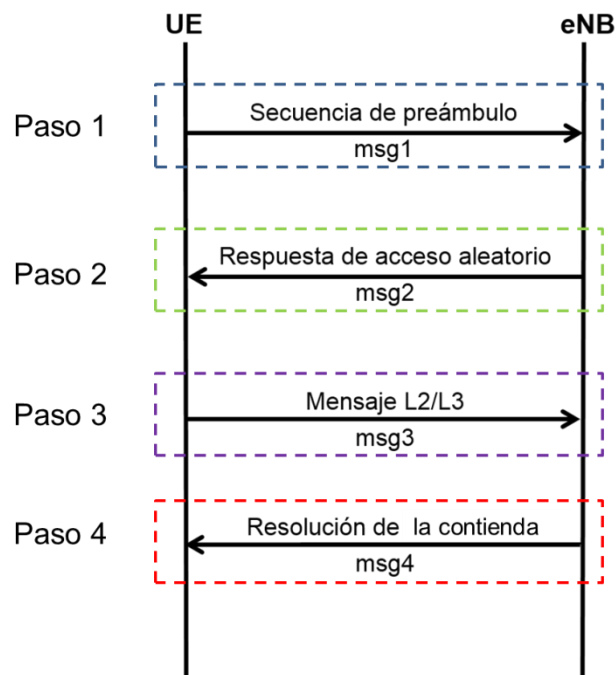


Figura 1.6 Proceso de acceso aleatorio basado en contienda. Basado en [35].

En el paso 3, el equipo terminal sincroniza los tiempos de transmisión de UL de acuerdo a la información recibida y transmite el mensaje de capa L2/L3 (msg3) en los recursos de UL asignados.

<sup>9</sup> La colisión ocurre cuando dos o más terminales escogen la misma secuencia de preámbulo y la transmiten en el mismo instante de tiempo.

<sup>10</sup> Mensaje que envía el eNB al UE otorgando permiso para transmitir en UL.

<sup>11</sup> Tiempo que debe esperar el UE para reintentar un proceso de acceso aleatorio basado en contienda. Este parámetro es configurado previamente por el eNB.

Una vez se transmite el mensaje msg3, el equipo terminal inicia un temporizador de resolución de la contienda para revisar posibles colisiones. En el caso de colisión de RA, puede que el eNB no sea consciente de la colisión y responda con el mensaje RAR. Por consiguiente, cada uno de los dispositivos que colisionan transmite su mensaje msg3, causando una colisión en el eNB. Si ninguno de los mensajes msg3 son decodificados con éxito, los dispositivos colisionados repiten el primer paso después de la expiración de la ventana de tiempo de resolución de la contienda<sup>12</sup>. Pero, si el eNB decodifica uno de los msg3 colisionados, responde con el identificador de dispositivo de UE en el cuarto paso. Sólo el equipo terminal que detecte coincidencia entre el identificador de dispositivo de UE recibida en el cuarto paso y la identidad transmitida en el mensaje msg3 puede enviar una respuesta H-ARQ positiva al eNB.

En el último paso, si el eNB decodifica correctamente el mensaje msg3, transmite un mensaje de resolución de la contienda (msg4) al dispositivo correspondiente.

El procedimiento libre de contienda asigna preámbulos dedicados a los UEs. Como muestra la Figura 1.7 el proceso inicia por el eNB mediante la asignación del preámbulo de Acceso Aleatorio (RA, *Random Access*) en el siguiente paso el UE transmite el preámbulo de RA y por último el eNB responde con el mensaje RAR. Esta técnica se resume en tres pasos debido a que el proceso de RA libre de contienda no presenta colisiones.

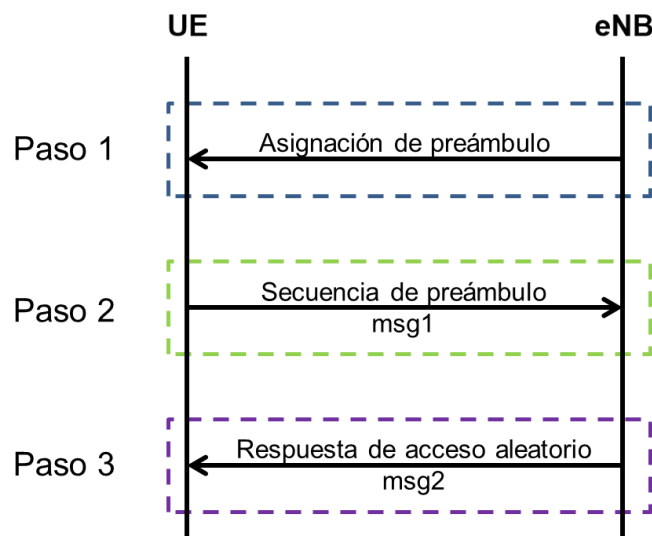


Figura 1.7 Proceso de acceso aleatorio libre de contienda. Basado en [17].

### 1.3.5 Gestión de Recursos Radio (RRM)

La RRM tiene como objetivo administrar eficientemente los recursos radio de la red por medio de procedimientos, principalmente en las capas 1 y 2 según la pila de protocolos del modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, *Open System Interconnection*) [4], [12], [17], [36].

<sup>12</sup> Especifica el número de subtramas consecutivas durante el cual el UE debe hacer monitoreo una vez transmitido el msg3.

Algunos procedimientos que tiene la RRM son: Control de Potencia (PC, *Power Control*) en UL, Modulación y Codificación Adaptativa (AMC, *Adaptative Modulation and Coding*), Control de Movilidad (MC, *Mobility Control*), Planificación de Paquetes (PS, *Packet Scheduling*), Balanceo de Carga (LB, *Load Balancing*), Control de Admisión Radio (RAC, *Radio Admission Control*) y control de movilidad de la conexión RRC.

A continuación se explican algunas funciones que son relevantes para el desarrollo de este trabajo:

#### **1.3.5.1 Control de movilidad de la conexión RRC**

El establecimiento y mantenimiento de la conexión RRC se rige por dos funciones principales del CP: el Re-establecimiento de la conexión RRC y el procedimiento de RA (ver sección 1.3.4).

El Re-establecimiento de la conexión RRC se inicia cuando un UE en el estado conectado pierde su conexión (por ejemplo, debido a fallas en el enlace radio, fallas en el HO o errores en la reconfiguración de conexión RRC).

#### **1.3.5.2 Control de Admisión Radio (RAC)**

Esta función se encarga de admitir o rechazar las solicitudes de establecimiento de nuevas RBs. Para ello, el RAC tiene en cuenta el estado general de los recursos en la E-UTRAN, los niveles de prioridad, la QoS proporcionada a sesiones en curso y los requerimientos de QoS de la solicitud de la RB. El objetivo del RAC es garantizar la utilización adecuada de los recursos radio (acepta las solicitudes de una RB siempre y cuando existan recursos radio disponibles) y al mismo tiempo proporcionar la QoS adecuada para las sesiones presentes [37].

#### **1.3.5.3 Planificación de Paquetes (PS)**

Esta función determina cuales UEs deben ser atendidos, el ancho de banda asignado a cada uno y la ubicación del mismo en el espectro radioeléctrico [4]. En general, para llevar a cabo la decisión de la asignación, el algoritmo de planificación tiene en cuenta información sobre los requerimientos de QoS y el estado del canal para cada usuario en las diferentes subportadoras.

#### **1.3.6 Marco de QoS en LTE**

Cuando un UE se une a la red, se crean dos tipos de RBs, una por defecto y otra dedicada. La RB por defecto se usa para la conectividad básica e intercambio de mensajes de control y queda establecida durante toda la vida útil de la conexión. A través de esta se envía todo el tráfico IP de usuario sin distinción alguna. Las RBs dedicadas, son portadoras adicionales que se establecen cada vez que se crea un servicio específico en aras de proporcionar un trato de QoS a ese determinado flujo de paquetes IP, por ejemplo, los correspondientes a una aplicación de videoconferencia.

Con el fin de dar soporte a los requerimientos de QoS en las aplicaciones multimedia, los flujos se mapean a RBs dedicadas y un Identificador de Clase de QoS (QCI, *QoS Class Identifier*) se asigna a cada RB.

En LTE hay dos tipos de RBs: con Tasa de Bits Garantizada (GBR, *Guaranteed Bit Rate*) y no GBR (no-GBR). Las RBs tipo GBR tienen garantizadas la tasa de bit que requieren, mientras que las no-GBR, no [28], [38].

El valor QCI asignado determina cómo la RB debería ser atendida teniendo en cuenta los siguientes parámetros: tipo de recurso (GBR o no-GBR), Retardo Asignado al Paquete (PDB, *Packet Delay Budget*), la Tasa de Pérdida de Paquetes Erróneos (PELR, *Packet Error Loss Rate*) y prioridad [8].

El PDB describe el tiempo máximo que los paquetes pueden pasar en tránsito a través de las capas RLC y MAC entre la red y el UE [29]. Se interpreta como el retardo límite con nivel de confianza del 98 %, es decir, la QoS se considera satisfecha cuando el porcentaje de paquetes que excedan el PDB es menor al 2 %,

$$Pr\{Packet\ delay \geq PDB\} \leq 0,02.$$

La PELR define un límite superior a la tasa de pérdida de paquetes no relacionados con la congestión.

Por último, la prioridad indica la importancia de la RB [28].

En LTE, a través del QCI se definen varias clases de servicio [30]. La Tabla 1-1 muestra cada clase de servicio caracterizada por el tipo de portadora (GBR y no-GBR), nivel de prioridad, retardo de entrega máxima admitido y pérdidas de paquetes.

Tabla 1-1 Identificador de Clase de QoS para LTE. Basado en [17].

QCI	Tipo de recurso	Prioridad	Retardo de paquetes [ms]	Pérdidas de paquetes	Ejemplo de servicios
1	GBR	2	100	$10^{-2}$	Voz
2	GBR	4	150	$10^{-3}$	Video (Transmisión en vivo)
3	GBR	5	300	$10^{-6}$	Video no conversacional
4	GBR	3	50	$10^{-3}$	Juegos en tiempo real
5	no-GBR	1	100	$10^{-6}$	Señalización IMS
6	no-GBR	6	300	$10^{-3}$	Video (transmisión del <i>buffer</i> )
7	no-GBR	7	100	$10^{-3}$	Voz, video (transmisión en tiempo real), juegos interactivos
8	no-GBR	8	300	$10^{-6}$	Servicios basados en TCP (WWW, e-mail, FTP)
9	no-GBR	9	300	$10^{-6}$	



En este contexto, la definición general de QoS se traduce en variables que caracterizan el rendimiento experimentado por los usuarios. Un conjunto de parámetros de QoS, se asocia a una RB dependiendo de los datos de la aplicación que transporta, lo que permite clasificar distintos tipos de flujo.

## 1.4 COMUNICACIÓN M2M

### 1.4.1 Definición

La Comunicación M2M conocida también como MTC, es una forma de comunicación en la que se intercambian datos entre dos o más máquinas remotas, de tal manera, que mediante este intercambio es posible controlar y supervisar automáticamente procesos en los que intervienen máquinas sin que el ser humano se involucre necesariamente en todo o parte del proceso [39], [40], [41].

La Figura 1.8 muestra el escenario general en el que conviven las comunicaciones H2H y algunas aplicaciones de M2M.

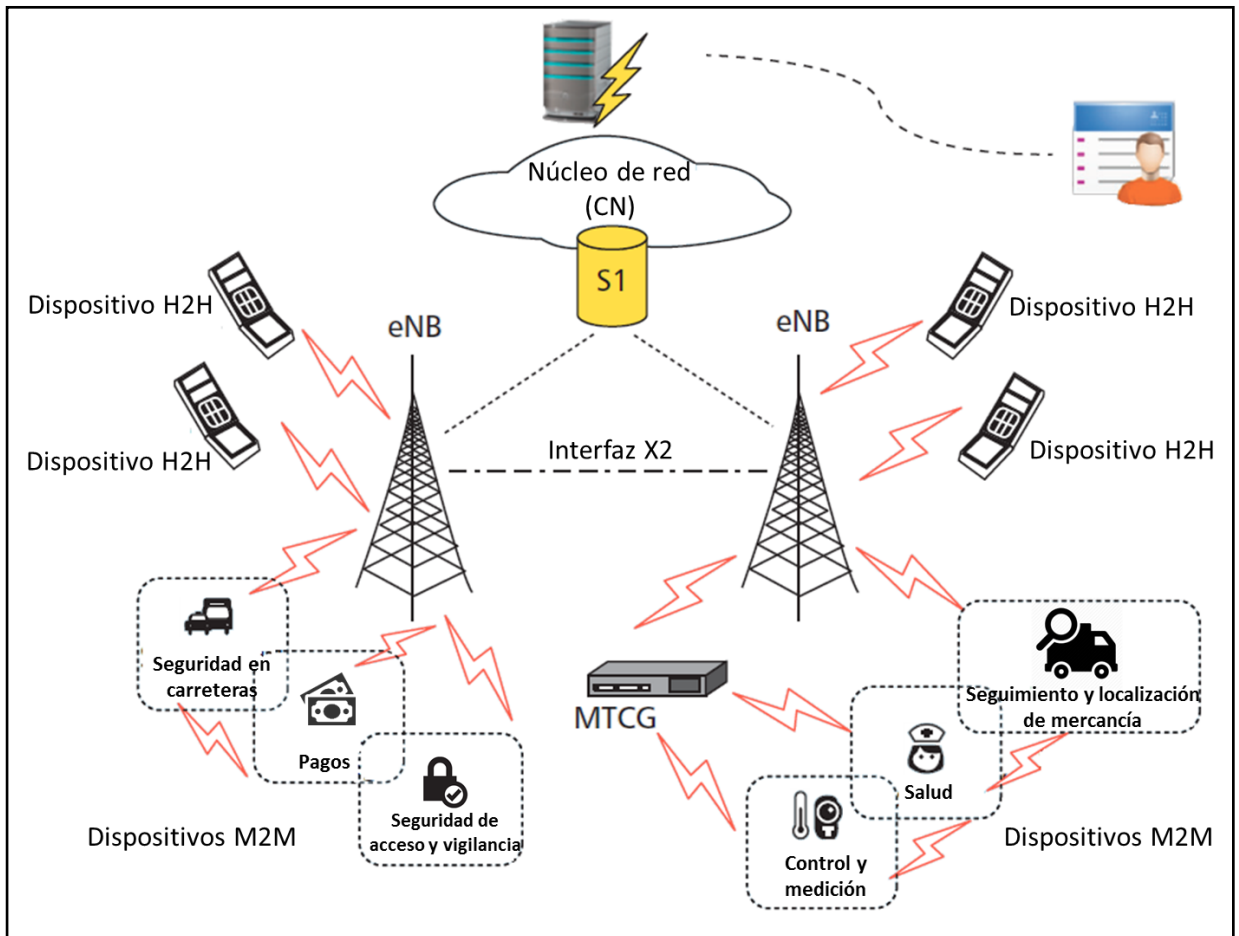


Figura 1.8 Comunicaciones máquina a máquina en redes LTE/LTE-A. Basado en [45].

### **1.4.2 Características**

En MTC los diferentes dispositivos se pueden comunicar entre ellos directamente y/o con uno o un conjunto de servidores MTC. Previendo dos tipos de escenarios: un escenario adaptado a un modelo cliente/servidor, donde se considera la comunicación entre los MTCDs y uno o más servidores, dependiendo del tipo de aplicación. Este escenario es implementado en aplicaciones como vigilancia en interiores, salud en casa o medición de potencia, agua o gas. Otros tipos de aplicaciones como gestión descentralizada de energía [42] y automatización del hogar [41] utilizan un escenario tipo Peer-to-Peer (P2P), mediante el cual los MTCDs se comunican directamente entre sí [43].

En cuanto a la asignación de recursos radio para las comunicaciones M2M y H2H existen dos posibilidades: dividir los recursos para cada tipo de usuario ó compartirlos entre todos los usuarios. Dividir los recursos entre los dispositivos implica dar una cantidad exclusiva para cada tipo de comunicación, y compartirlos conlleva a dar igual prioridad tanto para los MTCDs como los dispositivos H2H [43].

### **1.4.3 Arquitectura y elementos clave de MTC**

La arquitectura general de las aplicaciones M2M incluye los siguientes elementos [44]:

- Dispositivo M2M, o también denominado MTCD, se refiere a los terminales capaces de capturar los eventos y datos, para luego ser transmitidos de forma autónoma o responder a las solicitudes sobre datos contenidos en los dispositivos.
- Pasarela M2M o MTCG. Estos aseguran la interconexión entre los MTCDs y trabaja para la comunicación de la red usando capacidades M2M.
- Aplicación M2M. Es el destino de un dato enviado por un dispositivo a través de la red. Es utilizado por los motores de procesamiento de negocio específico como los servidores.

### **1.4.4 Aplicaciones**

Algunos organismos de estandarización mediante sus grupos de investigación han contemplado los casos de uso que se presentan en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2 Casos de uso M2M contemplados por los organismos de estandarización [46]–[50].

Caso de Uso (Aplicación)	Organismo			
	3GPP	ETSI	IEEE <sup>13</sup>	ITU-T
Control y medición	X	X	X	X
Seguridad en carreteras	X	X		
Dispositivos electrónicos de consumo	X	X	X	
Seguridad de acceso y vigilancia			X	X
Seguimiento y localización de mercancía	X	X	X	X
Seguridad pública			X	
Pagos	X	X	X	X
Salud	X	X	X	X
Control y mantenimiento remoto	X	X	X	X

#### 1.4.5 Clasificación del tipo de tráfico MTC

Las aplicaciones M2M se clasifican en tres clases de tráfico basado en cómo se origina la petición de recurso, estas son [44]:

- I. Aplicaciones activadas por evento (*Event-driven*): estas aplicaciones tienen más prioridad que el resto. Cada vez que se produce un evento los MTCDs envían mensajes al servidor después de conectarse a la red, informando sobre la importancia del suceso, por ejemplo un paro cardíaco de una persona en el caso de monitoreo médico en el hogar. Mientras no hayan eventos, los MTCDs están desconectados de la red y permanecen en reposo.
- II. Aplicaciones activadas por consulta (*Query-driven*): en este tipo de aplicaciones, los MTCDs conectados a la red son activados por un servidor MTC remoto el cual envía solicitudes a estos dispositivos. Por lo tanto, los MTCDs pueden enviar los datos después de haber accedido a la red.
- III. Aplicaciones activadas por tiempo (*Time-driven*): estas siguen el principio de las aplicaciones activadas por evento (*Event-driven*), pero en este caso, los MTCDs pueden enviar datos periódicamente.

### 1.5 DESAFÍOS Y SOLUCIONES DE MTC SOBRE REDES LTE/LTE-A

#### 1.5.1 Desafíos

Gracias a las especificaciones de LTE y a la comercialización de los servicios que hacen los operadores con esta red, el despliegue de las comunicaciones M2M sobre LTE ha sido posible debido a factores como:

<sup>13</sup> IEEE ha estudiado en su grupo de trabajo estas aplicaciones, sin embargo estas solo han sido concebidas para trabajar con el estándar 802.16, no para redes LTE/LTE-A [48].

- Rápida expansión de la cobertura en redes LTE.
- Aumento en la capacidad de tráfico.
- Nuevos módulos que tienen un diseño mejorado y precios más bajos [45].

Sin embargo, se deben considerar otros aspectos importantes para el uso eficiente de este tipo de comunicaciones sobre las redes LTE, los desafíos de mayor importancia son:

- ✓ Garantizar una probabilidad mayor de éxito en el acceso a la red radio para un gran número de MTCDs por celda.
- ✓ Soportar las diferentes características de tráfico de las comunicaciones M2M, como mensajes de paquetes pequeños e intervalos de transmisión regulares.
- ✓ Asegurar baja latencia y alta fiabilidad.
- ✓ Garantizar bajo consumo de energía.
- ✓ No afectar negativamente a las comunicaciones H2H.

Así pues, teniendo en cuenta que:

- i) El volumen de datos transmitidos por los MTCDs es pequeño en la mayoría de los casos.
- ii) La cantidad de MTCDs en una celda puede llegar a ser muy grande [47].
- iii) La frecuencia de conexión es mucho mayor que la de los dispositivos de comunicación H2H.

Se produce una tasa baja de éxito en el acceso aleatorio y alta congestión de red en el PRACH causando posibles retardos inesperados, pérdida de paquetes, desperdicio de recursos radio, consumo de energía extra, e incluso la interrupción del servicio.

### 1.5.2 Soluciones propuestas por el 3GPP

Uno de los desafíos que implica garantía en la QoS en redes LTE/LTE-A es el control eficiente en el acceso a la red radio [45] ya que por medio de estas funciones se puede disminuir la congestión en la red debido a señalización causada por una gran cantidad de MTCDs intentando casi simultáneamente conectarse a la red, al mismo tiempo que otros dispositivos activan, modifican, o desactivan una conexión [39], [51].

El 3GPP ha propuesto varias soluciones que abordan el problema de congestión teniendo en cuenta el acceso aleatorio tales como [46]:

- **Separación de recursos RACH para MTC:** divide los recursos RACH en dos grupos contemplando los siguientes mecanismos: división de preámbulos, determinación de intervalos de tiempo específico o asignación de rangos particulares de frecuencia para dispositivos H2H y MTC [45].
- **Asignación dinámica de recursos RACH:** asigna dinámicamente los recursos de RACH para el uso de los MTCDs teniendo en cuenta predicciones de acceso hechas por la red.
- **Restricción de acceso por clase (ACB, Access Class Barring):** regula a los UE la oportunidad de transmisión de la secuencia de preámbulo por medio de la creación de clases de acceso donde se priorizan los servicios y aplicaciones.

- **Restricción Extendida de Acceso (EAB, *Extended Access Barring*):** La red controla selectivamente los intentos de acceso que hacen los UEs configurados en modo EAB (estos dispositivos se consideran más tolerantes a las limitaciones en el acceso que los otros UEs presentes en la red) con el fin de evitar la sobrecarga en la red de acceso y/o núcleo de red, sin la necesidad de introducir nuevas clases de acceso. En caso de congestión, la red puede restringir el acceso de los UEs configurados con EAB al mismo tiempo que permite el acceso a otros dispositivos.

La presentación de los conceptos LTE/LTE-A y M2M con sus determinadas características permite introducir el contexto en el cual se desarrolló este trabajo. Se resalta la presentación del escenario que integra las comunicaciones móviles tradicionales (H2H) con una tecnología reciente encaminada hacia el IoT, M2M, además de los retos que conlleva esta unión.

Analizar el impacto que tiene el acceso masivo de los MTCDs en la QoS, requiere profundizar en las funciones RRM de LTE y en especial las relacionadas con la asignación de recursos, como lo es el proceso de PS. Es así como en el siguiente capítulo se aborda el UL, con el objetivo de identificar los parámetros que se tiene en cuenta para garantizar QoS.

## **2. CAPÍTULO DOS. PLANIFICACIÓN DE PAQUETES EN EL ENLACE ASCENDENTE**

### **2.1 INTRODUCCIÓN**

Con el surgimiento de la transmisión inalámbrica de datos a través del Protocolo de Internet (IP, *Internet Protocol*), nació a su vez la necesidad de mecanismos que permitieran un uso eficiente de los recursos disponibles en las redes de comunicaciones, tal y como lo hace la RRM en LTE/ LTE-A.

De acuerdo con el capítulo anterior, en estas redes una de las funciones principales de la RRM es la PS, que consiste en asignar los recursos a los usuarios dentro del área de cobertura de la celda informando cuales usuarios pueden transmitir y bajo qué esquema de codificación y modulación [4].

El presente capítulo expone el proceso de PS para el UL con algunas estrategias utilizadas para garantizar QoS.

### **2.2 PLANIFICACIÓN DE PAQUETES**

#### **2.2.1 Definición de planificación de paquetes**

La planificación es el proceso a través del cual el eNB decide a cuales UEs debe asignarle recursos para que puedan enviar o recibir datos. El modo en que se escogen estos usuarios y se asignan los recursos depende de una estrategia específica del planificador de paquetes [4].

#### **2.2.2 Definición de planificador de paquetes**

El planificador de paquetes es un componente funcional del eNB que tiene como función asignar los recursos a los usuarios que se encuentran en el área de cobertura de la celda decidiendo qué usuarios transmiten en cada momento y bajo qué Esquemas de Modulación y Codificación (MCS, *Modulation and Coding Scheme*).

#### **2.2.3 Funcionamiento del planificador de paquetes**

El planificador de paquetes, para cada subtrama generada decide cual usuario transmite y en que PRB. Por lo tanto, se encarga de asignar la pareja subportadora/periodo de tiempo a cada usuario, como ilustra la Figura 2.1.

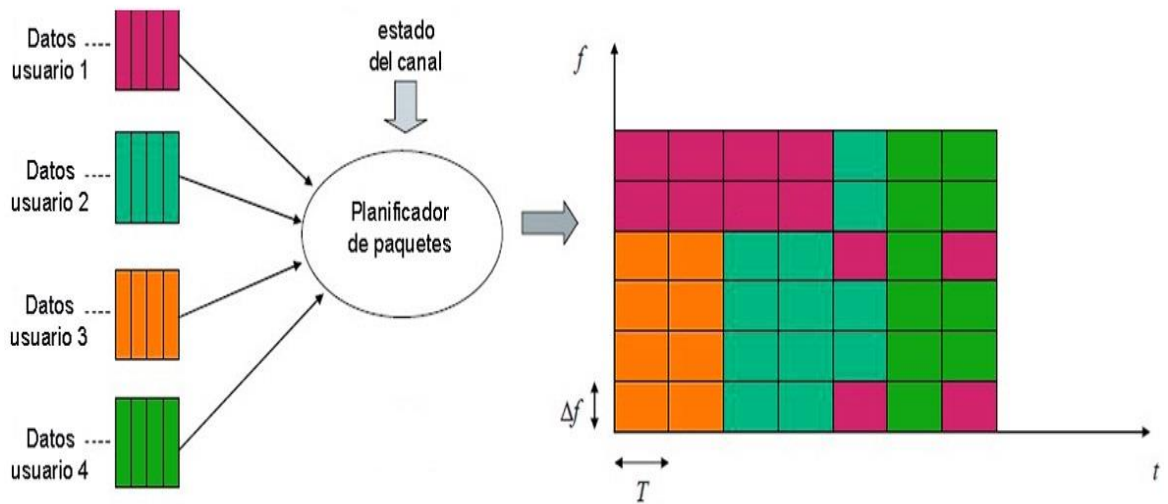


Figura 2.1 Funcionamiento de la PS. Basado en [4].

Debido a restricciones de señalización, solo a un número limitado de usuarios puede asignársele recursos en un mismo Intervalo de Tiempo de Transmisión (TTI, *Transmission Time Interval*) [52]. El planificador selecciona cuáles usuarios serán planificados según un criterio de asignación de recursos, que depende del algoritmo de planificación, teniendo en cuenta el estado de los *buffers*, las prioridades y requisitos de QoS, y la información del estado del canal que observa cada usuario en las diferentes subportadoras con el fin de no asignar RBs donde se presente elevada atenuación o interferencia [53].

#### 2.2.4 Planificación de paquetes en el enlace ascendente

La planificación tanto para el DL como para el UL, es parte de la capa MAC en el eNB. Ambas tienen muchas similitudes, pero también diferencias sustanciales. En DL el eNB accede directo a las colas de cada una de las RBs, teniendo así una información precisa sobre el tamaño de los *buffers* de cada uno de los usuarios y el retardo de los paquetes en las colas. Otra de las características del DL es que el eNB no tiene acceso directo a la información sobre las condiciones del canal. Para que los planificadores puedan conocer el estado de este en cada uno de los usuarios, las mediciones se hacen y se envían por el UE usando el CQI. Este mensaje se envía al eNB periódicamente sobre el PUCCH.

Por otro lado, en UL, el eNB no conoce el tamaño de los *buffers* de los UE, ni tiene acceso al retardo de los paquetes en ellos. Además, debe asignar las transmisiones de un mismo usuario en PRBs continuos debido al uso de la técnica de acceso múltiple SC-FDMA.

Con el fin de informar el tamaño del *buffer* al eNB, el UE envía un mensaje llamado Reporte del Estado del *Buffer* (BSR, *Buffer Status Report*). Este se utiliza para solicitar recursos de transmisión en el UL. El BSR contiene el número de bytes en cada uno de los *buffers* de las RBs [38].

La información que requiere enviar el UE mediante el UL son los datos del UP y los datos del CP [4].

#### **2.2.4.1 Estrategias de Planificación**

El estándar de LTE indica que se debe implementar el planificador de paquetes como una de las funcionalidades de RRM, sin embargo no especifica el algoritmo que se debe utilizar, por lo tanto cada fabricante es responsable de implementar la estrategia que mejor considere. En este sentido, se han definido diversas técnicas de PS, algunas de las cuales toman en consideración las condiciones del canal, otras que intentan realizar una asignación justa entre usuarios y otras cuyo objetivo es maximizar la capacidad de la red [53].

#### **2.2.4.2 Clasificación de planificadores de paquetes**

Existen varios factores que afectan la forma en que se realiza la asignación de recursos, lo que lleva a diferentes enfoques en la clasificación de la PS. Estos enfoques no son mutuamente excluyentes, por el contrario, están relacionados.

Con base en la clasificación de planificadores de paquetes realizado en [54], se retoma la información de los planificadores cuyas métricas de asignación están basadas en la información del canal.

##### **➤ Con Base en la Información de Calidad del Canal**

Este tipo de planificador tiene en cuenta si se envía o no el CQI, originando dos subtipos de planificación: la que tienen en cuenta el estado de canal (*Channel-aware*) y la que no tienen en cuenta el estado del canal (*Channel-unaware*) [55].

##### **i. Planificación Que No Tiene en Cuenta el Estado del Canal**

En la planificación *channel-unaware*, el UE no envía mediciones de calidad del canal al eNB, por lo tanto las decisiones sobre la asignación de recursos se toman sin tenerla en cuenta [56].

##### **ii. Planificación Que Tiene en Cuenta el Estado del Canal**

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

Al emplear la planificación *channel-aware* el planificador de paquetes explota la diversidad multi-usuario mediante la asignación de los recursos a varios usuarios en función de sus condiciones de canal [57]. Lo anterior debido a que cada uno percibe el canal de forma diferente. Si se elige el usuario que tenga la mejor condición del canal para asignarle recursos en cada subtrama, se logra que el sistema trabaje más cercano a su capacidad [4]. Entre más usuarios tenga el sistema (siempre y cuando no se sobrepase su capacidad) y más rápidas sean las variaciones del canal, el beneficio de la diversidad multiusuario es mayor.



La planificación *cannel-aware* tiene a su vez una clasificación: la planificación consciente de la QoS (*QoS-aware*) y no consciente de la misma (*no QoS-aware*).

La planificación *QoS-aware* se centra en la eficiencia espectral de los flujos en tiempo real, como el vídeo y la VoIP; se trata de maximizar la velocidad de transmisión de los datos priorizando el tráfico en tiempo real sobre el resto [58].

El retardo máximo, el *throughput*, la tasa de bits garantizada y la tasa de error son algunos de los parámetros más importantes para el logro de los requisitos de QoS de las redes LTE [59], [60].

Tradicionalmente el tráfico de Red se atiende mediante el modelo de servicios de Mejor Esfuerzo (BE, *Best Effort*), esto es, que no se garantiza ninguna característica de fiabilidad, retardo o ancho de banda, sino que hace el mejor esfuerzo por transportar los datos al destino. Por lo tanto un planificador *QoS-aware* debe ser capaz de asignar recursos de manera eficiente cuando se considera además de la condición de canal al menos alguno de los parámetros nombrados.

Por el lado de la planificación no *QoS-aware* simplemente no se consideran parámetros para la provisión de QoS, sino que únicamente se tiene en cuenta la condición del canal.

La Tabla 2-1 presenta algunas estrategias de asignación de recursos para planificadores de UL con la métrica utilizada por cada uno y la clase a la que pertenecen.

Tabla 2-1 Ejemplos de planificadores de paquetes.

N°	Nombre del planificador	Métrica	Channel-aware	QoS-aware	Fairness
1	GBR-ALRE [61]	Reparto justo y GBR	SI	SI	SI
2	<i>Bandwidth and QoS Aware scheduler (BQA)</i> [62], [63]	Recursos entregados en el pasado TTI	SI	SI	NO
		GBR			
		Retardo			
		<i>Throughput</i>			
3	<i>Modified Largest Weighted Delay First (M-LWDF)</i> [14]	Retardo y tasa de transmisión	SI	SI	NO
4	<i>Multiple Channel Scheduling Algorithm (MC-SA)</i> [58]	Retardo y GBR	SI	SI	NO
5	<i>Single Channel Scheduling Algorithm (SC-SA)</i> [58]	Retardo y GBR	SI	SI	NO
6	<i>Z-Based QoS Scheduler (ZBQoS)</i> [8]	Retardo y tasa de transmisión	SI	SI	NO
7	<i>Power-Efficient Scheduler</i> [64]	Potencia máxima de transmisión	SI	SI	NO
		GBR			
		Retardo			
		Asignación contigua			
8	<i>Adaptive SPS Algorithm</i> [63]	CQI	SI	NO	NO
9	<i>Maximum Carrier-to-Interference Ratio Algorithm (Max C/I)</i> [65]	CQI	SI	NO	NO
10	<i>Maximum Throughput</i>	<i>Throughput</i>	SI	NO	NO
11	<i>Minimum Area Difference (MAD)</i> [57], [58]	Reparto justo	SI	NO	SI
12	<i>Proportional Fairness Algorithm (PF)</i>	Reparto justo y <i>Throughput</i>	SI	NO	SI
13	<i>Recursive Maximum Expansion (RME)</i> [57], [58]	Reparto justo	SI	NO	SI
14	<i>Riding Peaks algorithm</i> [66]	CQI	SI	NO	NO
15	<i>First Maximum Expansion (FME)</i> [57], [58]	Reparto justo	SI	NO	SI
16	<i>Delay Sensitive Scheduler</i> [67]	Retardo	-	SI	NO
17	<i>Proportional Fair with Guaranteed Bit Rate (PFGBR)</i> [58]	Reparto justo y GBR	-	SI	NO
18	<i>Round Robin (RR)</i> [66], [65]	Encolado justo	NO	NO	NO

Los algoritmos de la Tabla 2-1 hacen parte de al menos una de las clases de planificación expuestas. Se resalta que 15 de los planificadores listados son *channel-aware*, de los cuales 7 son también *QoS-aware*. Como parte de sus métricas de asignación de recursos, seis de ellos consideran al retardo, los cuales aparecen sombreados en la tabla.

El algoritmo BQA además de utilizar al retardo de los paquetes como métrica para la planificación, tiene en cuenta otros aspectos como *throughput*, GBR y recursos entregados en el anterior TTI. Asimismo, los algoritmos MC-SA, *Power-Efficient Scheduler* y SC-SA utilizan métricas adicionales. Por tanto centrándose en el retardo como única consideración para brindar planificación con QoS se filtra el listado y se obtienen dos opciones finales: M-LWDF y ZBQoS.

M-LWDF utiliza el retardo del paquete Cabeza de la Fila (HoL, *Head of the Line*) para garantizar QoS dando una prioridad más alta a aquel servicio que tenga el mayor tiempo en cola. Por el lado del ZBQoS, se garantiza QoS priorizando en TD a los usuarios con mayor retardo en el HoL, y en FD a aquellos con la mejor calidad de canal.

Para el presente trabajo, de las dos opciones planteadas, se elige el planificador ZBQoS debido a que su estrategia de asignación de recursos depende en igual medida del retardo del paquete HoL y de la tasa de transmisión de paquetes, mientras que el planificador M-LWDF prioriza solo alguna de las dos métricas en cuestión, quitándole relevancia al retardo.

### 2.2.4.3 Proceso general de planificación en UL

En la planificación de UL, el eNB no conoce de forma automática los recursos que requiere el UE para transmitir. Por tanto, antes de que el dispositivo pueda hacerlo, primero envía una Petición de Planificación (SR, *Scheduling Request*) para solicitar el permiso de transmisión. Cuando el planificador recibe la SR, responde con el *grant* con los recursos de tiempo/frecuencia que el UE debe utilizar, así como el formato de transporte.

Después que el UE haya recibido el *grant*, puede transmitir datos con los parámetros requeridos. Luego, el denominado BSR puede ser enviado.

El proceso general de planificación de UL se ilustra en la Figura 2.2.

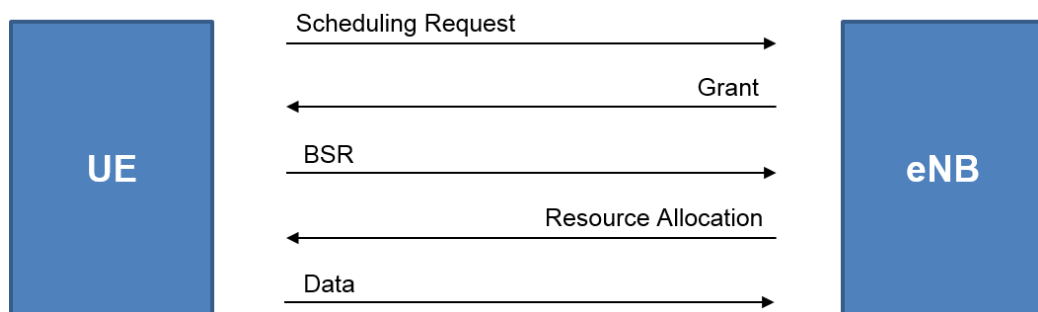


Figura 2.2 Proceso general de planificación de UL. Basada en [23].

### 2.2.4.4 Petición de planificación (SR, *Scheduling Request*)

Es un mensaje especial de capa física que el UE envía al eNB para solicitar un mensaje *Grant* y obtener recursos para transmitir en el PUSCH [68],[69].

#### 2.2.4.5 Grant

Es un mensaje que envía el eNB al UE llevando información específica del Canal Físico de Control de Enlace Descendente (PDCCH, *Physical Downlink Control Channel*) otorgando permiso para transmitir en UL, exactamente 4 ms después de haber recibido el *Grant*.

El *Grant* se envía en un mensaje conocido como Información de Control de Enlace Descendente (DCI, *Downlink Control Information*) formato 0, además reporta los Recursos Asignados (*Resource Allocation*) y el MCS a usar. Por otro lado, una vez el UE recibe este mensaje, debería transmitir los datos mediante los PRBs y MCS especificados en él [70], [71].

#### 2.2.4.6 Reporte de Estado del Buffer (BSR, *Buffer Status Report*)

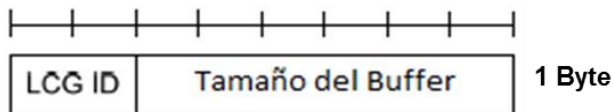
El BSR es un tipo de Elemento de Control (CE, *Control Element*) de capa MAC que lleva información en el UL sobre la cantidad de datos que tiene el UE almacenado en su *buffer*.

Según [68], el BSR se clasifica:

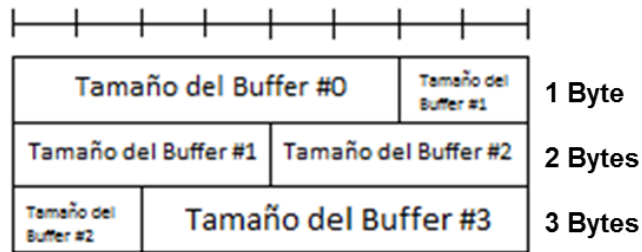
- según la estructura.
- según la periodicidad de envío.

En términos de estructura, hay dos tipos. Uno de ellos es el BSR corto y el otro es el BSR largo. Con el corto, el UE puede informar la cantidad de datos en *buffer* sólo para un grupo de canales lógicos (LCG, *Logical Channel Group*) específico, identificándose al inicio de la trama, en el campo 'LCG ID' como se muestra en la Figura 2.3a. En el BSR largo, el UE puede informar acerca del *buffer* de todos los LCG. Por lo tanto no existe el campo 'LCG ID'.

El campo en bytes "Tamaño del *buffer*" identifica la cantidad total de datos disponible en el LCG.



(a)



(b)

Figura 2.3 Estructura del BSR. (a) Corto y (b) Largo. Basada en [27].

Independientemente de si es un BSR largo o corto, el "Tamaño del *buffer*" es un campo de 6 bits, lo que significa que representa valores de 0 a 63. Este campo corresponde al valor del Índice de la Tabla 2-2.

Tabla 2-2 Rangos del tamaño del *buffer* para el BSR.

Índice	Valor del Tamaño del Buffer (BS) [bytes]	Índice	Valor del Tamaño del Buffer (BS) [bytes]
0	BS = 0	32	1132 < BS <= 1328
1	0 < BS <= 10	33	1328 < BS <= 1552
2	10 < BS <= 12	34	1552 < BS <= 1817
3	12 < BS <= 14	35	1817 < BS <= 2127
4	14 < BS <= 17	36	2127 < BS <= 2490
5	17 < BS <= 19	37	2490 < BS <= 2915
6	19 < BS <= 22	38	2915 < BS <= 3413
7	22 < BS <= 26	39	3413 < BS <= 3995
8	26 < BS <= 31	40	3995 < BS <= 4677
9	31 < BS <= 36	41	4677 < BS <= 5476
10	36 < BS <= 42	42	5476 < BS <= 6411
11	42 < BS <= 49	43	6411 < BS <= 7505
12	49 < BS <= 57	44	7505 < BS <= 8787
13	57 < BS <= 67	45	8787 < BS <= 10287
14	67 < BS <= 78	46	10287 < BS <= 12043
15	78 < BS <= 91	47	12043 < BS <= 14099
16	91 < BS <= 107	48	14099 < BS <= 16507
17	107 < BS <= 125	49	16507 < BS <= 19325
18	125 < BS <= 146	50	19325 < BS <= 22624
19	146 < BS <= 171	51	22624 < BS <= 26487
20	171 < BS <= 200	52	26487 < BS <= 31009
21	200 < BS <= 234	53	31009 < BS <= 36304
22	234 < BS <= 274	54	36304 < BS <= 42502
23	274 < BS <= 321	55	42502 < BS <= 49759
24	321 < BS <= 376	56	49759 < BS <= 58255
25	376 < BS <= 440	57	58255 < BS <= 68201
26	440 < BS <= 515	58	68201 < BS <= 79846
27	515 < BS <= 603	59	79846 < BS <= 93479
28	603 < BS <= 706	60	93479 < BS <= 109439
29	706 < BS <= 826	61	109439 < BS <= 128125
30	826 < BS <= 967	62	128125 < BS <= 150000
31	967 < BS <= 1132	63	BS > 150000

Por otro lado, hay tres tipos de BSR de acuerdo con la periodicidad de envío: BSR regular, BSR periódico, BSR de relleno.

- **BSR regular:** se envía cuando
  - ✓ Un nuevo dato llega al *buffer* y tiene mayor prioridad que el que está esperando en él, o cuando estando el *buffer* vacío llega un nuevo dato.
  - ✓ Un temporizador denominado temporizador de retransmisión (“retxBSR-Timer”<sup>14</sup>) se vence y el UE tiene algunos datos para transmitir (envío de un BSR regular).
- **BSR periódico:** se envía cada determinado tiempo de acuerdo con un intervalo predefinido por la red, el cual se le informa al UE y se activa cuando el temporizador de periodicidad (“periodicBSR-Timer”<sup>15</sup>) caduca.
- **El BSR de relleno** se envía después de que el UE ha recibido el *grant*, siempre y cuando el número de bits de relleno en un mensaje de datos es más grande que el tamaño de BSR, utilizando este espacio de bits de relleno para enviar el BSR.

El proceso de PS en UL en redes LTE/LTE-A es uno de los puntos esenciales para garantizar QoS a los diferentes tipos de tráfico, por tanto, se expuso el procedimiento y los algoritmos que logran este propósito. Asimismo, se escogió un planificador específico para ser implementado debido a su capacidad para la provisión de QoS mediante el uso de la métrica del retardo.

Garantizar requisitos de QoS para servicios en tiempo real requiere que el eNB conozca el retardo del paquete HoL de cada una de las RBs del usuario. Debido a que 3GPP solo contempla que el eNB envíe información sobre el tamaño de los *buffers* utilizando los BSRs y no datos relacionados con el retardo de paquetes [72], se requieren algoritmos para estimar el retardo basado en la llegada de los BSRs para proporcionar QoS en el UL [14].

En el capítulo 3 se realiza una descripción de los algoritmos de estimación de retardo considerados para la implementación de los escenarios de simulación.

---

<sup>14</sup> El temporizador de re-transmisión de BSR provee un mecanismo para reponerse de situaciones donde un BSR es transmitido, pero no recibido. El UE transmite otro BSR si no se recibe el *grant* antes de que el temporizador expire. Nota: El temporizador se reinicia cada vez que un *grant* es recibido.

<sup>15</sup> El temporizador del BSR periódico es usado por la RRC para controlar el reporte de los BSRs.



### 3. CAPÍTULO TRES. ALGORITMOS DE ESTIMACIÓN DE RETARDO

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

Como se mencionó en el capítulo anterior un gran número de planificadores, conscientes de la QoS, utilizan el retardo como parte de sus métricas de planificación para la asignación de recursos. Sin embargo en UL, el estándar LTE no permite el envío de esa información por motivos de sobrecarga de señalización. Así, los eNBs no cuentan con el reporte de cuánto tiempo llevan los paquetes en la cola de los *buffers* de los UEs [27].

En estas redes el mecanismo comúnmente usado para abordar tal situación es la implementación de un algoritmo en los eNBs que es responsable de estimar el retardo de los paquetes en cola basado en la llegada de los BSRs estandarizados por el 3GPP. Así, el planificador de UL es consciente de este tiempo y a partir de esta información puede priorizar las peticiones de planificación, asignando mayor prioridad a las que estén más próximos de superar su PDB.

Por otro lado, en redes LTE el retardo que experimentan los terminales para acceder a la red puede llegar a ser muy alto en presencia de una gran cantidad de MTCDs, y a su vez puede provocar el descarte de paquetes afectando la provisión de la QoS [9].

Este capítulo describe algunos algoritmos propuestos en la literatura para estimar el retardo de los paquetes en cola basándose en la llegada de los BSRs.

#### 3.2 ALGORITMOS DE ESTIMACIÓN DE RETARDO

Los algoritmos de estimación de retardo del paquete HoL existentes en la literatura, como los presentados en [14], [23] y [92] usan información relacionada a los BSRs para hacer tal estimación en el eNB. Los propuestos en [14] y [23] son los más populares con una complejidad relativamente baja, permitiendo su utilización en la mayoría de los eNBs actuales. A diferencia de estos trabajos, el presentado en [92] estima el retardo teniendo en cuenta el efecto de las retransmisiones H-ARQ aumentando considerablemente la complejidad del desarrollo a nivel de simulación tanto de la técnica, como del algoritmo.

Los tres algoritmos realizan el cálculo siguiendo las especificaciones del estándar LTE definido por el 3GPP. Los algoritmos se basan en la retroalimentación de los UEs con el eNB a través de los BSRs. Obtienen el tamaño del *buffer* de un servicio determinado proveniente del UE y capturan los tiempos en el que estos mensajes llegan al eNB.

En este trabajo se plantea la implementación de los algoritmos encontrados en [14] y [23].

##### 3.2.1 Contexto

La Figura 3.1 ilustra un ejemplo de la llegada de los paquetes y de los BSRs al UE y al eNB respectivamente. Para la explicación del mismo se supone que:



- I. Un nuevo BSR llega al eNB en el tiempo  $T_s^i$ , donde  $i$  representa un servicio cualquiera y  $s$  el instante de tiempo en el que llega.
- II. Los paquetes que llegan al UE en el tiempo  $t_{k-7}$  no están planificados en el tiempo  $T_s^i$  y son almacenados en el UE.

Cuando el eNB planifica los paquetes en el tiempo  $T_s^i$ , el planificador de QoS considera a todos los paquetes reportados como nuevos, es decir no tienen retardos, así hayan llegado al UE en el tiempo  $t_{k-7}$  con un retardo real de  $T_s^i - t_{k-7}$ .

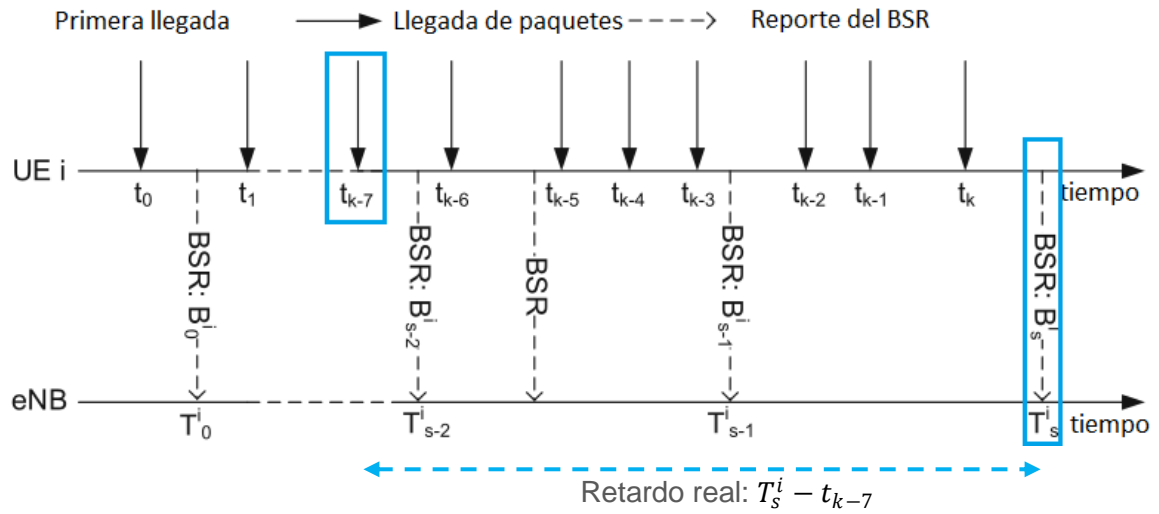


Figura 3.1 Ejemplo de la llegada de los paquetes y BSRs al UE y al eNB. Basado en [14].

Utilizando el tiempo de llegada del BSR, el eNB podría además de conocer el tamaño del *buffer* de los UEs y tener almacenados temporalmente estos mensajes, ser consciente del retardo del paquete más antiguo de la cola mediante algún método de estimación de retardo.

Los algoritmos de estimación escogidos en este trabajo consideran la información de tiempo de llegada de los BSRs para calcular el retardo que llevan los paquetes en los *buffers* de los UEs. Cada uno realiza el cálculo de una forma distinta y contemplando variables y parámetros propios. Las secciones 3.2.1 y 3.2.2 presentan las características y funcionamiento de los dos algoritmos implementados.

### 3.2.2 Algoritmo 1

Con base en [14] se implementa este algoritmo que almacena los BSRs provenientes de los UEs, con el valor de la cantidad de datos en los *buffer* y el tiempo de llegada al eNB. Esta información se utiliza en el momento de asignar recursos, priorizando aquellos que llevan más tiempo en cola y requieran garantía de QoS.

✓ **Funcionamiento**

Este algoritmo introduce el uso de una cola virtual<sup>16</sup> en el eNB, la cual es creada por el planificador de UL cada vez que llega un nuevo servicio que conecta a la red con el UE. La cola guarda los paquetes de datos a ser planificados y sus retardos estimados. Esta información se actualiza de acuerdo a la información de los BSRs.

Se cuenta con dos parámetros de control: el intervalo de estimación ( $I_{est}$ ) y la profundidad de la cola virtual ( $M$ ). El parámetro  $I_{est}$ , controla la carga de computación debido al exceso de BSRs que se genera a medida que aumenta el número de UEs.  $M$  indica la profundidad de la cola con la que se hace el cálculo de la estimación del retardo del paquete HoL, es un número natural que simboliza el número de BSRs previos que se considerarán para la estimación. Cada BSR precedente que se requiera representa un paso.

La Figura 3.2 muestra un ejemplo con  $M = 2$  para el cálculo del retardo del paquete HoL.

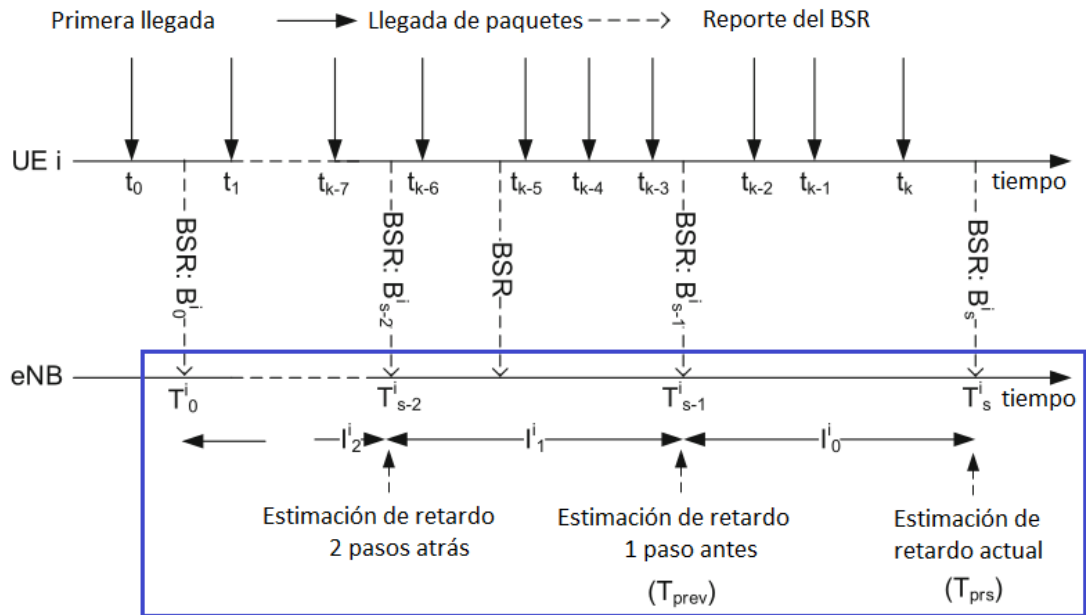


Figura 3.2 Ejemplo de 2 pasos para la estimación de retardo del Algoritmo 1 ( $M=2$ ). Basado en [14].

La estimación de retardo para un servicio  $i$  cualquiera que se realiza en un tiempo  $T_s^i$  requiere de la definición de las variables mostradas en la Tabla 3-1.

<sup>16</sup>Fila de almacenamiento temporal que guarda información.

Tabla 3-1 Notación de las variables utilizadas y sus descripciones. Basado en [6].

Notación	Descripción
$M$	Número de pasos para la estimación.
$I_{est}$	Intervalo de tiempo para la estimación del retardo.
$T_{prs}$	Tiempo actual.
$T_{prev}$	Tiempo de la estimación previa con respecto al actual.
$T_{s-m}^i$	Tiempo de la $m$ -ésima estimación de retardo previa con respecto al $T_s^i$ recibido, $0 \leq m \leq M$ .
$B_{s-m}^i$	Valor del BSR para el servicio $i$ en el tiempo $T_{s-m}^i$ ; $0 \leq m \leq M$ .
$I_m^i$	Intervalo de tiempo entre $T_{s-m}^i$ y $T_{s-m-1}^i$ ; $0 \leq m \leq M$ .
$R_m^i$	Cantidad de datos a planificar para el servicio $i$ en la cola $m$ -ésima; $0 \leq m \leq M$ .
$D^i$	Cantidad de datos planificados para el servicio $i$ durante el intervalo de tiempo $I_0^i$ .
$\widehat{W}_m^i$	Retardos estimados de los datos a planificar $R_m^i$ para $0 \leq m \leq M$ .
$\tau_i$	PDB del servicio $i$ .

El esquema fue diseñado bajo el supuesto que los paquetes no son eliminados de las colas del UE a pesar del alto tráfico que se pueda presentar. En la práctica, los paquetes pueden ser borrados por los UEs impidiendo el envío de la información a los eNBs.

Inicialmente el planificador establece la cantidad de datos en cola,  $R_m^i$  y los retardos correspondientes,  $\widehat{W}_m^i$ , (para  $0 \leq m \leq M$ ) a cero y a -1, respectivamente.

Después del ajuste de las variables anteriores, el planificador revisa las llegadas de BSRs cada TTI. Cuando el eNB recibe un BSR de un servicio  $i$ , determina si el tiempo transcurrido desde la anterior estimación de retardo,  $T_{prev}$ , al actual,  $T_{prs}$ , es igual o mayor que el intervalo de tiempo prefijado,  $I_{est}$ . Si este es mayor, entonces el eNB sigue el procedimiento de estimación.

El planificador de paquetes clasifica en  $M+1$  grupos los datos almacenados en  $R_m^i$  y los nuevos datos reportado por el BSR,  $B_{s-m}^i$  en orden descendente de  $m$ , así como lo define la ecuación (3.1).

$$R_m^i = \begin{cases} R_M^i + R_{M-1}^i & \text{if } m = M, \\ R_{m-1}^i & \text{if } 1 \leq m \leq M - 1, \\ B_s^i - \sum_{n=1}^M R_n^i & \text{if } m = 0. \end{cases} \quad (3.1)$$

Debido a que los BSRs solo informan el total de los datos almacenados, los datos nuevos, definidos como  $R_0^i$ , son la diferencia entre la cantidad de datos actuales,  $B_s^i$ , y la cantidad de datos no planificados previamente,  $\sum_{n=0}^M R_n^i$ .

Después de clasificar los paquetes, el planificador asigna los retardos calculados según han sido estimados. La ecuación (3.2) muestra cómo se calculan estos retardos para cada uno de los pasos.

$$\widehat{W}_m^i = \begin{cases} \frac{I_0^i}{2} \text{ if } m = 0, \\ \frac{I_0^i}{2} + \sum_{k=1}^m I_k^i \text{ if } 1 \leq m \leq M. \end{cases} \quad (3.2)$$

Donde  $I_k^i = T_{s-k}^i - T_{s-k-1}^i$ .

En la estimación de retardo de (3.2), si  $R_m^i$  es cero en (3.1), entonces se ajusta el retardo correspondiente,  $\widehat{W}_m^i$  a -1.

Si no hay reporte de BSRs o si el tiempo que transcurre entre la estimación anterior y la presente es más pequeño que el tiempo prefijado de  $I_{est}$ , el planificador incrementa en uno todos los valores estimados,  $\widehat{W}_m^i$ , para los  $\widehat{W}_m^i \geq 0$ .

De los retardos estimados,  $\widehat{W}_m^i$ , se define el retardo del HoL,  $\widetilde{W}_i(t)$ , del servicio  $i$  en el tiempo de planificación, así como lo muestra la ecuación (3.3):

$$\widetilde{W}_i(t) = \max_{0 \leq m \leq M} \widehat{W}_m^i \quad \text{tal que } \widehat{W}_m^i \geq 0. \quad (3.3)$$

Si  $\widetilde{W}_i(t)$  es negativo, entonces el servicio  $i$  será excluido de la próxima planificación, ya que el servicio no tiene datos para planificar.

La reconfiguración de parámetros y estimación de retardos también se realiza después de la planificación. Los datos en cola se actualizan en orden descendente, de  $M$  a cero, hasta que  $R_m^i > 0$  o  $m = 0$ , lo cual se define en la ecuación (3.4).

$$R_m^i = \max\{\sum_{k=m}^M R_k^i - D^i, 0\}. \quad (3.4)$$

Siendo  $D^i$  la cantidad total de datos para planificar.

Si  $R_m^i$  es cero, entonces el retardo estimado correspondiente es  $\widehat{W}_m^i = -1$ .

El procedimiento de estimación que sigue este algoritmo se resume en el diagrama de flujo de la Figura 3.3.

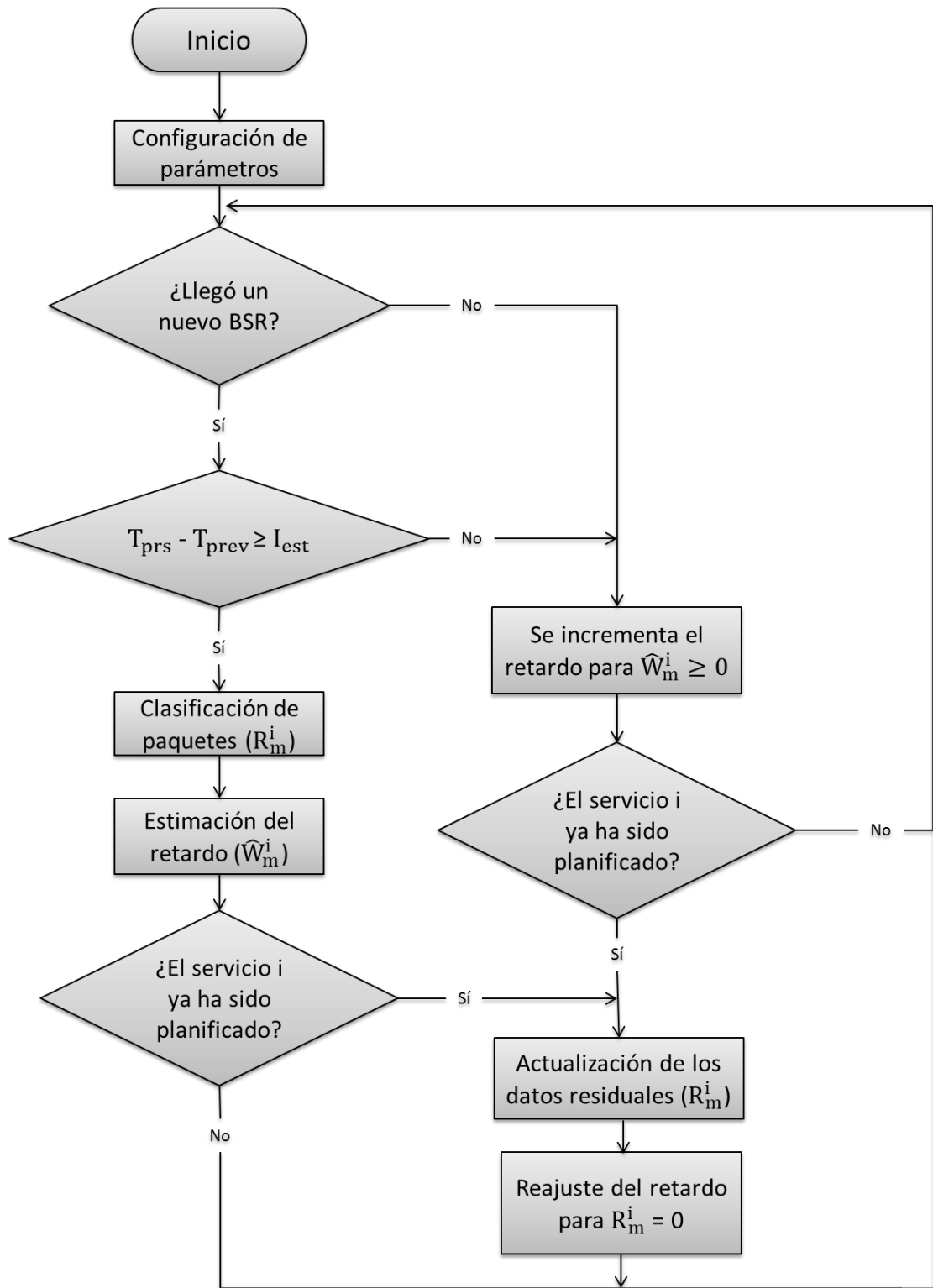


Figura 3.3 Diagrama de flujo del funcionamiento del Algoritmo 1. Basado en [14].

- **Ejemplo**

El número de pasos,  $M$  y el intervalo de estimación  $I_{est}$  que se escogen para este ejemplo es 2 y 40 ms respectivamente.

La cola virtual actualiza los paquetes a ser planificados y sus respectivos retardos después de la llegada de un BSR o después de la planificación de paquetes. Está representada por  $C$  y cada actualización por un subíndice.

Los intervalos de estimación de retardo anteriores al instante  $T_{s-1}^i$  se suponen de 40 ms.

Los retardos estimados,  $\hat{W}_m^i$ , van aumentando por cada TTI hasta que un mensaje BSR se recibe.

Posterior a la recepción del BSR con 180 bytes del servicio  $i$  en el tiempo  $T_{s-1}^i$ , los datos en cola y los retardos estimados se establecen  $C_2$  en como muestra la Figura 3.4.

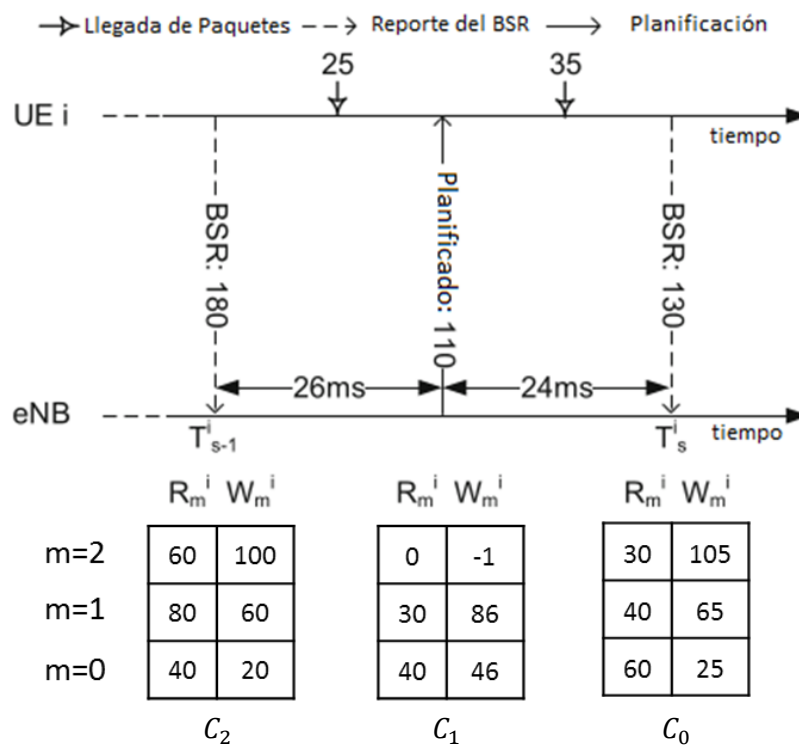


Figura 3.4 Ejemplo del funcionamiento del Algoritmo 1. Basado en [14].

Si el eNB planifica el servicio  $i$  para 110 bytes de datos, entonces se actualizan los datos en cola de acuerdo con (3.4), y si algún  $R_m^i$  es cero, se fija el  $\hat{W}_m^i$  correspondiente a -1.

La cantidad de datos planificados  $D^i (= 110)$  es mayor que  $R_2^i (= 60)$ , de modo que en  $C_1$ ,  $R_2^i$  y  $R_1^i$  se convierten en *cero* y 30 respectivamente. Como  $R_2^i$  es *cero*, el planificador establece  $\hat{W}_2^i$  a -1. Las operaciones realizadas para obtener los resultados son las siguientes:

$$\text{En } C_2: R_2^i = 60, D^i = 110.$$

$$\text{Actualización a } C_1: R_2^i = 60 - 110 = -50 \rightarrow R_2^i = 0$$

El resultado negativo indica que aún hay recursos para planificar paquetes del siguiente paso ( $R_1^i$ ).

$$\text{En } C_2: R_1^i = 80, D^i = 50 \\ \text{Actualización a } C_1: R_1^i = 80 - 50 \rightarrow \mathbf{R_1^i = 30}$$

$$\text{En } C_2: R_0^i = 40, D^i = 0 \\ \text{Actualización a } C_1: R_0^i = 40 - 0 \rightarrow \mathbf{R_0^i = 40}$$

Se recibe un BSR con 130 bytes en el tiempo  $T_s^i$ , el cual incluye dos nuevas llegadas de paquetes al UE entre  $T_{s-1}^i$  y  $T_s^i$ , el planificador de paquetes reclasifica los datos almacenados en  $M + 1$  grupos, como se explica en (3.1), y las estimaciones de los retardos correspondientes son actualizados en  $C_0$  de acuerdo con (3.3).

En  $C_1$ ,  $R_2^i$  es *cero*, por lo tanto, el planificador mueve  $R_1^i$  y  $R_0^i$  a  $R_1^i$  y  $R_2^i$ , respectivamente.

$$\text{Actualización a } C_0: R_2^i = 0 + 30 = 30 \text{ y } R_1^i = 40$$

Dado que los nuevos datos de llegada del servicio  $i$  es la diferencia entre la cantidad de datos en el BSR (130 bytes) y la cantidad total a ser planificados por el eNB (70 bytes),  $R_0^i$  se establece en 60 bytes.

$$R_0^i = 130 - (30 + 40) = 130 - 70 = 60$$

Los retardos  $\widehat{W}_0^i$ ,  $\widehat{W}_1^i$  y  $\widehat{W}_2^i$  son calculados de acuerdo a (3.2), cabe resaltar que  $\widehat{W}_0^i$  se establece en la mitad del tiempo transcurrido desde el momento de la estimación anterior hasta el actual.

$$\widehat{W}_0^i = \frac{26+24}{2} = \frac{50}{2} = 25 \\ \widehat{W}_1^i = 25 + 40 = 65 \\ \widehat{W}_2^i = 25 + 40 + 40 = 105$$

### 3.2.3 Algoritmo 2

En esta sección, se explica el segundo algoritmo seleccionado, que calcula el retardo del paquete HoL. Este esquema tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

- i. Existe un *buffer* con capacidad infinita.
- ii. El control de la longitud de la cola se realiza sólo de forma discontinua, es decir, sólo se conoce la longitud de la cola en intervalos de tiempo discretos.
- iii. La longitud del intervalo de tiempo de monitoreo<sup>17</sup> se conoce y se considera bastante pequeño.
- iv. El valor de la cantidad de datos atendidos por el *buffer* durante cada intervalo de tiempo está disponible.

<sup>17</sup> Intervalo de tiempo que se utiliza para verificar la llegada de nuevos paquetes.

Por conveniencia, se utiliza  $t_i$  para denotar el tiempo de control de la cola, y  $Q_i$  para la longitud de la cola en  $t_i$ . El intervalo de tiempo entre  $t_{i-1}$  y  $t_i$  se denota  $\Delta t_i$ , y los datos planificados durante el intervalo de tiempo  $\Delta t_i$  se denota como  $L_i$ .

- **Funcionamiento**

La Figura 3.5 muestra el procedimiento de estimación de retardo en los tiempos  $t_0$ ,  $t_1$  y  $t_2$ . Cada instante está representado como un recuadro en el que se muestra mediante dos líneas continuas el tamaño de la cola y el tiempo que lleva en ella. En el instante  $t_0$ , no hay una longitud para la cola porque no hay datos en el *buffer*, por lo tanto el retardo es cero. Después de un intervalo de tiempo  $\Delta t_1$ , la longitud de la cola se supone es  $Q_1$ , sin embargo, como se mencionó en el contexto, se desconoce cuándo llegaron exactamente estos paquetes al *buffer* del UE. Por ello, el tiempo de llegada de los paquetes se asume como el resultado de una distribución uniforme entre  $t_0$  y  $t_1$ , obteniendo el retardo del paquete HoL como lo muestra la ecuación (3.5).

$$\frac{t_1 - t_0}{2} = \Delta t_1 / 2. \quad (3.5)$$

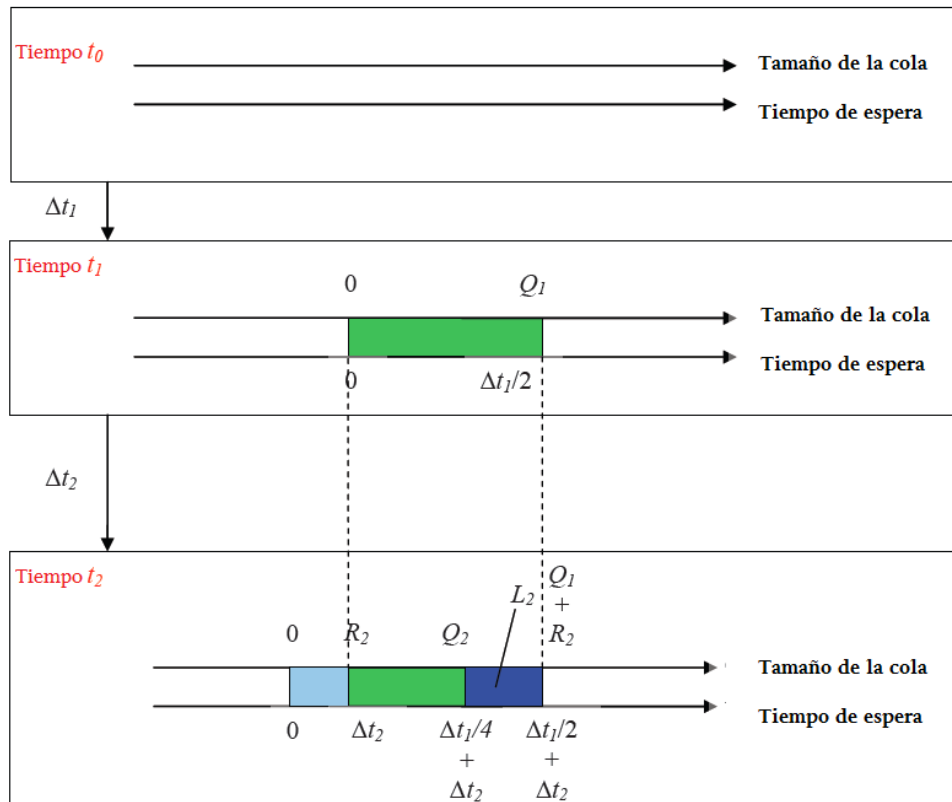


Figura 3.5 Retardo estimado en los tiempos  $t_0$ ,  $t_1$  y  $t_2$ . Basado en [23].

Pasado un intervalo de tiempo  $\Delta t_2$  la longitud de la cola se conoce como  $Q_2$ . Existen dos situaciones posibles: una, que el *buffer* se desocupe totalmente y se presente la misma situación que en el instante  $t_0$ , o, que aún exista una cola en el *buffer*, con paquetes nuevos y antiguos ya atendidos.



Para la estimación del retardo del paquete HoL en el instante  $t_2$ , el algoritmo tiene en cuenta los siguientes casos:

- Caso 1:

Se considera que el *buffer* tiene sólo ingresos de paquetes  $R_2$  y ninguno de egreso. Además, se puede notar que los datos en cola que parten de 0 en el instante  $t_1$ , en el tiempo  $t_2$  están con un retardo adicional  $\Delta t_2$ . Así, el retardo de la cola equivale a:

$$D_2 = \frac{\Delta t_1}{2} + \Delta t_2. \quad (3.6)$$

Donde  $D_2$  es el retardo del paquete HoL en  $t_2$ .

- Caso 2:

En la cola hay egresos de datos  $L_2$ , es decir, se atiende el paquete HoL cuyo tamaño se conoce como  $L_2$ .  $L_2 < Q_1 + R_2$ , de lo contrario el *buffer* estaría vacío y el proceso estaría en la situación del instante  $t_0$ .

Este caso se analiza de dos formas posibles,  $L_2 < Q_1$  y  $Q_1 < L_2 < Q_1 + R_2$ .

Si  $L_2 < Q_1$ , no todos los datos en la cola para el instante  $t_1$  han sido planificados. Tal y como muestra la Figura 3.5 para el instante  $t_2$ , el retardo de la cola está entre  $\Delta t_2$  y  $\frac{\Delta t_1}{2} + \Delta t_2$ . Teniendo en cuenta que  $\Delta t_2$  se supone muy pequeño, el retardo del paquete HoL se calcula así:

$$\begin{aligned} D_2 &= \frac{\Delta t_2 + \frac{\Delta t_1}{2} + \Delta t_2}{2} \\ &= \Delta t_2 + \frac{\Delta t_1}{4}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

La opción  $Q_1 < L_2 < Q_1 + R_2$ , significa que no sólo los datos en  $\Delta t_1$  han sido planificados, sino que también una parte de los nuevos ingresos  $R_2$  han sido atendidos. De esta manera el retardo se calcula como:

$$\begin{aligned} D_2 &= \frac{0 + \Delta t_2}{2} \\ &= \frac{\Delta t_2}{2}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

De acuerdo con las consideraciones iniciales,  $Q_2$  y  $L_2$  son conocidos, pero no  $R_2$ . Sin embargo,  $R_2$  puede ser calculado usando  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $L_2$ , así:

$$Q_2 = Q_1 + R_2 - L_2. \quad (3.9)$$

$$R_2 = Q_2 + L_2 - Q_1. \quad (3.10)$$

En resumen, el retardo del paquete HoL para el instante  $t_2$  se puede expresar en términos de  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $L_2$ , como:

$$D_2 = \begin{cases} \Delta t_2 + \frac{\Delta t_1}{4}, & \text{si } L_2 < Q_1 \\ \frac{\Delta t_2}{2}, & \text{si } L_2 > Q_1. \end{cases} \quad (3.11)$$

### Cálculo del retardo del paquete HoL en $t_n$ .

Para cada ingreso nuevo durante el intervalo  $\Delta t_i$ ,  $R_i$  se calcula y almacena en la cola hasta que se atiende. Así pues, los datos nuevos  $R_i$  se calculan mediante el control de la longitud de la cola y de los datos planificados, de la siguiente forma:

$$R_i = Q_i + L_i - Q_{i-1}, \quad (3.12)$$

Las variables  $Q_i$ ,  $L_i$  y  $Q_{i-1}$  son conocidas. Utilizando la ecuación (3.12), todos los valores de  $R_i$  pueden calcularse y registrarse.

La Figura 3.6 muestra el diagrama de flujo del Algoritmo 2. Para el estudio del mismo se considera lo siguiente:

- En cualquier momento,  $t_i$ , la longitud de la cola,  $Q_i$ , la cantidad de datos planificados por el eNB,  $L_i$ , y el intervalo de tiempo,  $\Delta t_i$ , se asumen conocidos.
- Los arreglos  $D[]$  y  $R[]$  almacenan respectivamente, el retardo de cola y la cantidad de bits recibidos en cada intervalo de tiempo.
- En cada intervalo de monitoreo se verifica la longitud de la cola y se ejecuta el algoritmo
- $Q_{ant}$  representa el tamaño del *buffer* del BSR anterior.
- $Q$  es el tamaño del último *buffer* recibido en el eNB.
- $\Delta t$  es la diferencia de tiempo entre el último BSR recibido y el anterior.
- *retardo* es una variable auxiliar para calcular el retardo HoL.

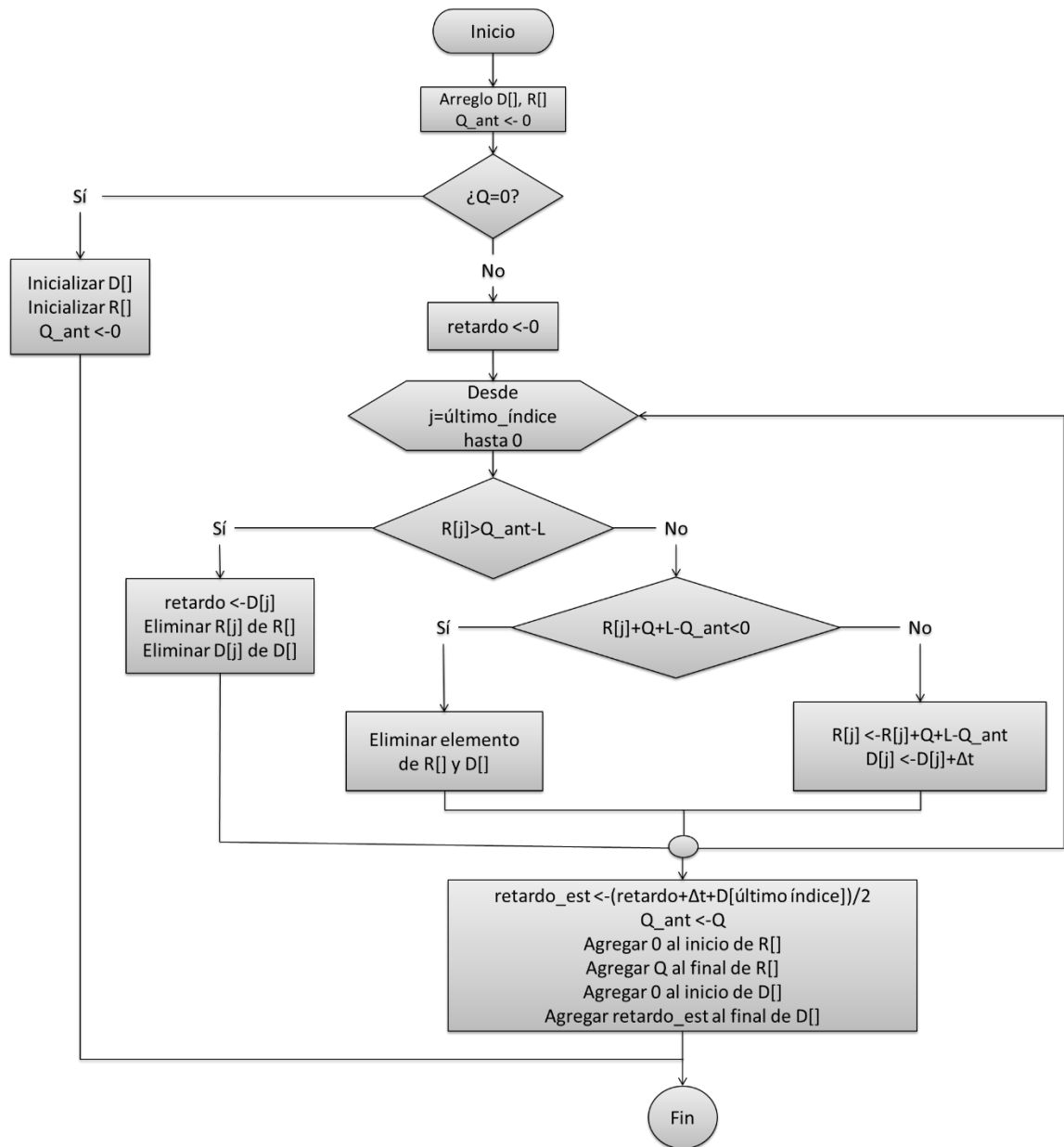


Figura 3.6 Diagrama de flujo del Algoritmo 2. Por los autores.

### ✓ Ejemplo

Para ejemplificar el funcionamiento del Algoritmo 2 se supone que han llegado 4 BSRs con la siguiente información:  $BSR_0 = 0$  bytes,  $BSR_1 = 100$  bytes,  $BSR_2 = 70$  bytes,  $BSR_3 = 0$  bytes, en los tiempo  $t_0, t_1, t_2, t_3$  respectivamente.

La Figura 3.7 ilustra que en el instante  $t_0$  se reporta la llegada al eNB de un BSR de 0 bytes, es decir  $Q = 0$ . Siguiendo el diagrama de flujo del Algoritmo 2 representado en la Figura 3.6, se inicializan los vectores  $D[]$  y  $R[]$ .

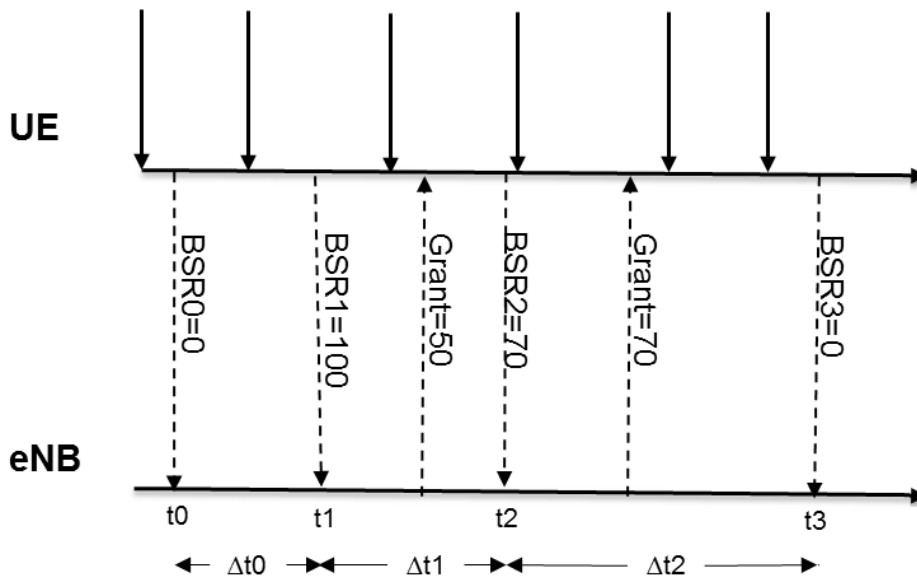


Figura 3.7 Ejemplo del Algoritmo 2. Por los autores.

En el instante  $t_1$ , llega un nuevo BSR. Teniendo en cuenta que la longitud del *buffer* que reporta es de *100 bytes* ( $Q = 100$ ), el siguiente paso en el diagrama de flujo es asignar el valor de cero a la variable *retardo*. Además, como ningún campo de los vectores  $D[]$  y  $R[]$  ha sido creado, los procesos definidos son:

- Calcular el valor del retardo del paquete HoL por medio de la variable  $retardo_{est}$  definida en el diagrama de flujo.

$$retardo_{est} = (0 + \Delta t_0)/2$$

- Asignar el valor de la cola actual a la variable  $Q_{ant}$

$$Q_{ant} = 100$$

- Agregar 0 en las cabeceras de los vectores  $D[]$  y  $R[]$ .

$$R[0] = 0 \quad D[0] = 0$$

- Agregar 100 al final de  $R[]$ .

$$R[1] = 100$$

- Agregar  $\frac{\Delta t_0}{2}$  al final de  $D[]$ .

$$D[1] = \frac{\Delta t_0}{2}$$

En el instante  $t_2$ , llega al eNB un BSR con un reporte de *70 bytes* ( $Q = 70$ ). Similar al caso anterior, haciendo un recorrido por el diagrama de flujo, la variable *retardo* se fija en *cero* y se inician los procesos evaluando los campos *cero* y *uno* de los vectores creados:

$$¿R[1] > Q_{ant} - L?$$

La Figura 3.7 ilustra que en el intervalo  $\Delta t_1$  se han planificado *50 bytes*, lo que significa que  $L = 50$ . Teniendo en cuenta que el valor de  $R[1]$  es *100* y que  $Q_{ant} - L = 100 - 50 = 50$ , la condición  $R[1] > Q_{ant} - L$  se cumple. Por lo tanto, el proceso continua con el siguiente paso, cálculo de la variable retardo (que en este caso corresponde al valor almacenado en  $D[1]$ ) y eliminación del campo  $D[1]$  y  $R[1]$ .

$$retardo = \frac{\Delta t_0}{2}$$

Continuando con las validaciones, se analizan los valores de los arreglos en la posiciones cero. Ahora,

$$\text{¿} R[0] > Q_{ant} - L?$$

$$\text{¿} 0 > 50?$$

La condición no se cumple porque 0 no es mayor que 50.

Continuando con el flujo, se analiza la siguiente condición:

$$\text{¿} R[0] + Q + L - Q_{ant} < 0?$$

$$\text{¿} 0 + 70 + 50 - 100 = 20 < 0?$$

Teniendo en cuenta que 20 no es mayor que cero, se procede a calcular los valores de  $R[0]$  y  $D[0]$ :

$$R[0] = 0 + 70 + 50 - 100 = 20$$

$$D[0] = 0 + \Delta t_1 = \Delta t_1$$

En el instante de tiempo  $t_2$  se tienen los siguientes resultados:

$$retardo_{est} = \frac{\frac{\Delta t_0}{2} + \Delta t_1 + \Delta t_1}{2} = \frac{\Delta t_0}{4} + \Delta t_1$$

$$Q_{ant} = 70$$

$$R[0] = 0 \qquad D[0] = 0$$

$$R[1] = 70 \qquad D[1] = \frac{\Delta t_0}{4} + \Delta t_1$$

En  $t_3$  la llegada del  $BSR_3 = 0 \text{ bytes}$  ( $Q = 0$ ) indica que la longitud de la cola y el retardo del paquete HoL es cero. En línea con el diagrama de flujo, se inicializan nuevamente los vectores  $D[]$  y  $R[]$ , y  $Q_{ant} = 0$ .

El proceso de estimación mediante este algoritmo calcula la variable  $retardo_{est}$ , que es el valor del tiempo que lleva el paquete HoL en cola, el cual es entregado al planificador *QoS-aware* para que sea tomado en cuenta para la asignación de recursos.

Los algoritmos presentados en este capítulo muestran cómo mediante el uso de los BSRs estandarizados por el 3GPP, se puede estimar el retardo de los paquetes encolados en los diferentes *buffers* del UE y en particular el del paquete HoL. Estos algoritmos son de vital importancia en redes LTE/LTE-A, pues esa variable es utilizada por el eNB para sus funciones de RRM, especialmente en la planificación de los paquetes en UL.

Así, estas dos opciones complementan la información necesaria para que los planificadores *QoS-aware* puedan garantizar requerimientos QoS a usuarios con servicios sensibles al retardo.



## 4. CAPÍTULO CUATRO. SIMULACIÓN, RESULTADOS Y ANÁLISIS.

### 4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe el proceso de simulación utilizado, los parámetros de los escenarios planteados y los resultados obtenidos con su análisis correspondiente.

### 4.2 SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

La herramienta de simulación debe soportar las características fundamentales de un sistema LTE/ LTE-A y cumplir con los siguientes requisitos:

- Configuración y simulación de sistemas de redes LTE/LTE-A.
- Creación y configuración de diferentes escenarios.
- Implementación de nuevos módulos como algoritmos de estimación de retardos.
- Soporte para dispositivos H2H y M2M.

#### 4.2.1 Herramientas software para simular Redes LTE/LTE-A

A continuación se describen las principales herramientas de simulación consideradas para redes LTE:

- **NS-3 (*Network Simulator*)**

Es un simulador de red de eventos discretos para sistemas de Internet, dirigidos principalmente a investigación y uso educativo basado en el lenguaje de programación C++. NS-3 es software libre, licenciado por Linux, y está a disposición del público para investigación, desarrollo y uso [73].

El simulador tiene dos componentes principales: el Módulo de LTE y el Módulo EPC y da soporte a la evaluación de los siguientes aspectos [74]: RRM, planificador de paquete QoS-aware, coordinación de interferencia entre celdas y acceso dinámico al espectro.

- **OPNET Modeler**

OPNET es un software licenciado desarrollado en C++ que proporciona un entorno virtual para modelar el comportamiento de red, diagnosticar problemas de forma eficiente, validar cambios y estudiar escenarios que incluyen crecimiento de tráfico, fallos de red, etc.

En este simulador, el modelo de red LTE está formado por nodos y entidades tales como UE, eNB, enrutadores, configuración de movilidad, servidores remotos y nodos central de información global [75].



- **SimuLTE**

Es una herramienta de simulación innovadora que permite la evaluación y desarrollo a nivel de sistema de redes LTE y LTE-A para el framework OMNeT++. El simulador es un software de código abierto escrito en C++, personalizable y con una interfaz sencilla que permite desarrollar nuevos módulos para la implementación de nuevos protocolos y algoritmos [76].

- **LTE-Sim**

Software de código libre, basado en C++ creado para simular estrategias de planificación de UL y DL en entornos de múltiples celdas y múltiples usuarios, teniendo en cuenta la movilidad del usuario, optimización de recursos radio, técnicas de reutilización de frecuencias, módulo de AMC, y otros aspectos relevantes para las comunidades industriales y científicas [77].

Actualmente existe una versión de LTE-Sim que tiene dos módulos únicos adicionales, uno para la asignación de recursos en el Canal Físico de Control de Enlace Descendente (PDCCH, *Physical Downlink Control Channel*) y el otro para el procedimiento de acceso aleatorio. Esta versión fue desarrollada por estudiantes de doctorado de la Universidad Estatal de Campinas.

La Tabla 4-1 presenta un resumen de las características evaluadas en cada simulador.

Tabla 4-1 Características principales de los simuladores.

Características	NS-3	OPNET Modeler	SimuLTE	LTE-SIM
Open source	✓	x	✓	✓
Simulación de UL	✓	✓	✓	✓
Soporte para diversidad de tráfico	✓	✓	✓	✓
Creación de escenarios	✓	-	-	✓
Acceso aleatorio	✓	x	x	✓
Soporte al control de recursos en el canal PDCCH	x	x	x	✓

Para el desarrollo de este trabajo de grado se compararon las funcionalidades de los cinco simuladores, seleccionando como herramienta de simulación a LTE-Sim debido a que además de cumplir con todos los requisitos planteados, tiene integrado dos componentes que lleva la simulación a un entorno más cercano al real: el módulo de control en PDCCH y el de proceso de acceso aleatorio.

### 4.3 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

La Metodología de simulación acogida para el desarrollo de este trabajo se basa en [78] y consta de los siguientes pasos:

- a. **Definición de escenarios y casos de simulación:** se definen los escenarios a implementar con sus respectivas características y casos de simulación.
- b. **Definición de las características de los escenarios de simulación:** se presentan los parámetros técnicos definidos para los escenarios de simulación.
- c. **Ejecución de las simulaciones:** se ejecutan las simulaciones.
- d. **Análisis de resultados:** se obtienen los resultados arrojados por el simulador y se realiza su respectivo análisis.

### 4.3.1 Definición de Escenarios y Casos de Simulación

#### 4.3.1.2 Escenarios

Para analizar el impacto en la QoS de redes LTE/LTE-A se plantean dos escenarios, ambos con un planificador *QoS-aware* (ZBQoS) y cada uno con una forma diferente de acceso múltiple basado en contienda. Las dos técnicas de acceso se denominan: técnica de acceso LTE tradicional y técnica de acceso híbrida.

- i. **Técnica de acceso LTE tradicional:** Se caracteriza porque tanto dispositivos M2M como H2H compiten por igual por las secuencias de preámbulos disponibles para iniciar el RA.
- ii. **Técnica de acceso aleatorio híbrido:** En este procedimiento se realiza una división de recursos para M2M y H2H por medio de la distribución de las secuencias de preámbulos en dos grupos. Basados en los trabajos [79] y [80] los criterios establecidos para repartir los recursos son:
  - ✓ 20 preámbulos para usuarios con QCI<5.
  - ✓ 32 preámbulos para usuarios con QCI>5.

#### 4.3.1.3 Casos de simulación

Los casos de simulación a contemplar están directamente relacionados con la forma de estimación del retardo del paquete HoL en el *buffer* del eNB. De tal manera, que dependiendo del mecanismo con que se obtiene dicho tiempo se presentan cuatro (4) casos:

- i. **Caso sin estimación del retardo:** El planificador considera el retardo de los BSRs como el tiempo que ha transcurrido desde su llegada al eNB hasta iniciar el proceso de planificación. Este es el caso que ocurre en la práctica.
- ii. **Caso retardo ideal:** Se tiene en cuenta el tiempo exacto que tardan los BSRs en ser transmitidos desde el UE hasta iniciar el proceso de planificación en el eNB. Este valor solo se puede obtener mediante simulación, debido a que únicamente el simulador tiene los tiempos de todos los procesos que se ejecutan en él [68].

- iii. **Caso estimación del retardo usando el Algoritmo 1:** En el proceso de planificación se toma el valor del retardo del paquete HoL estimado por el Algoritmo 1.
- iv. **Caso estimación del retardo usando el Algoritmo 2:** El planificador tiene en cuenta el retardo del paquete HoL calculado por el Algoritmo 2.

El resumen de los escenarios y los casos de simulación se presentan en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2 Escenarios y casos de simulación.

Escenarios de Simulación			
Escenario 1		Escenario 2	
Técnica de acceso LTE tradicional.		Técnica de acceso híbrida.	
Casos de Simulación			
Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Sin estimación del retardo.	Retardo ideal.	Estimación del retardo usando el Algoritmo 1.	Estimación del retardo usando el Algoritmo 2.

#### 4.3.2 Definición de las características de los escenarios de simulación

- Los dispositivos (HTC y MTC) se distribuyen uniformemente alrededor del eNB al inicio de la simulación y permanecen activos durante todo el tiempo de simulación.
- Si el retardo de cualquier paquete es mayor que el PDB establecido por la RB, el paquete se descarta.
- Por simplicidad en el proceso de planificación se asume que cada UE tiene sólo una RB con una sola clase de tráfico.

Las características específicas de los escenarios de simulación se muestran en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3 Parámetros de simulación. Basado en [9]

Parámetro	Descripción
Tipo de sistema	Celda única
Radio de la celda	0.5 Km
Modelo de canal	Modelo macro celda urbana
Tráfico	VoIP, video, video no-GBR, CBR y <i>Time-driven</i>
Número de usuarios HTC	30 (10 VoIP, 10 video, 5 video no-GBR, 5 CBR)
Número de MTCDs	De 0 a 2000 en incrementos de 500
Modelo de movilidad	<i>Random walk</i> (3 Km/h)
Ancho de banda del sistema	5 MHz
Frecuencia de la portadora	2 GHz
Duración del TTI	1 ms
Disponibilidad de preámbulos para acceso radio	52 preámbulos para la técnica LTE tradicional 52 preámbulos para la técnica híbrida divididos así: 32 para video no-GBR, CBR y <i>Timen driven</i> , y 20 para VoIP y video
Planificador de UL	ZBQoS

Con el fin de analizar el impacto que tienen las comunicaciones M2M sobre la QoS en las redes LTE/LTE-A, se modelan diferentes tipos de tráfico soportados por la red LTE/LTE-A tales como: Voz sobre IP (VoIP, *Voice over Internet Protocol*), video GBR, video no-GBR, Tasa de Bit Constante (CBR, *Constant Bit Rate*) y *Time-driven*.

La Tabla 4-4 muestra un resumen de las características generales de cada tipo de tráfico.

Tabla 4-4 Modelo de tráfico y requerimientos de QoS. Basado en [9].

Tráfico	VoIP	Video	Video no-GBR	CBR	<i>Time-driven</i>
Descripción	G.729 Modelo ON/OFF	H.264 Basado en Traza <sup>18</sup>	H.264 Basado en Traza	500 bytes cada 16 ms	125 bytes cada 5 s
Tasa de bit	8.4 Kbps	128 Kbps	128 Kbps	250 Kbps	200 bps
QCI	1	2	7	8	9
PDB	100 ms	150 ms	100 ms	300 ms	300 ms
GBR	8.4 Kbps	128 Kbps	128 Kbps	-	-
Proporción de paquetes perdidos (PLR, <i>Packet Loss Ratio</i> )	2 % [81], [82] 3% [83],[84] Qos intolerable para +3%	1% [85]	1% [85]	-	-

Del tráfico *Time-driven* se destaca que basándose en [9], la activación del momento en que los MTCDs acceden a la red se realiza utilizando la distribución beta<sup>19</sup> (3,4) en un intervalo de 11 s.

<sup>18</sup> Modelo que proporciona el número de bits que han sido usados para la codificación de las tramas de video y el nivel de calidad de la codificación [92]. Se utilizó la traza de video de Foreman disponible en LTE-Sim [77].

<sup>19</sup> Esta distribución se ha aplicado para modelar el comportamiento de variables aleatorias limitadas a intervalos de longitud finita. Está compuesta por dos parámetros denotados por  $\alpha$  y  $\beta$ , que controlan la forma de la distribución.

### 4.3.3 Ejecución de las simulaciones

La ejecución de las simulaciones se realiza en el software de red LTE llamado LTE-Sim. La versión utilizada en este trabajo está basada en la versión 5 y fue modificada por miembros del grupo del Laboratorio de Redes de Computadores, Instituto de Computación de la Universidad Estatal de Campinas en Brasil para simular de una forma más realista redes LTE con soporte para MTC. El tiempo de simulación definido es de 11 s para cada una de las cantidades de MTCDs consideradas, es decir por cada variación (0, 500, 1000, 1500, 2000) el programa se ejecuta 11s. Además, se realizaron 5 repeticiones para cada escenario de simulación.

### 4.3.4 Análisis y resultados

Existen diversas métricas tradicionales para evaluar el desempeño de redes LTE/LTE-A como por ejemplo: eficiencia espectral, retardo extremo a extremo, latencia, pérdida de paquetes, *throughput* y eficiencia energética. Sin embargo, para el análisis del impacto de MTCDs en la QoS es necesario evaluar un conjunto de parámetros que evidencien el comportamiento de la red en presencia de una gran cantidad de estos dispositivos. Por tal motivo, otras métricas no tan convencionales fueron analizadas tales como, el retardo de acceso a la red y el error de estimación.

Las métricas seleccionadas para analizar el desempeño de la red son:

**Proporción de paquetes perdidos (PLR, *Packet Loss Ratio*):** Los paquetes perdidos son aquellos paquetes transmitidos que no han conseguido llegar a su destino [86]. La relación se calcula de acuerdo a la ecuación (4.1):

$$PLR = 1 - \frac{N_{RX}}{N_{TX}}, \quad (4.1)$$

donde  $PLR$  es la proporción de paquetes perdidos,  $N_{RX}$  es la suma de todos los paquetes enviados por los UEs en UL y  $N_{TX}$  es la suma de los paquetes que llegan satisfactoriamente al destino (eNB).

**Retardo extremo a extremo:** Hace referencia al tiempo que los paquetes emplean desde el instante que son creados por la aplicación en el UE hasta que son recibidos efectivamente por su destino, en este caso el eNB. Esta métrica abarca los retardos de procesamiento, transmisión, propagación y encolamiento [87]. El retardo promedio extremo a extremo se define en (4.2).

$$D_{e2e} = \frac{D_{paquetes}}{N_{TX}}, \quad (4.2)$$

donde  $D_{paquetes}$  es la suma de todos los retardos de los paquetes recibidos exitosamente por el destino y  $N_{TX}$ .

**Retardo promedio de acceso aleatorio:** Es el tiempo transcurrido desde que el UE envía el preámbulo de RA hasta que recibe el mensaje de resolución de la contienda (msg4). El retardo promedio de RA se define como muestra la ecuación (4.3).

$$\bar{D}_{RA} = \frac{D_{RA}}{N_{RA \text{ correctos}}}, \quad (4.3)$$

donde,  $D_{RA}$  es la sumatoria de los retardos de RA de todos los usuarios y  $N_{RA \text{ correctos}}$  es la sumatoria de los mensajes de resolución de la contienda (msg4).

**Percentil 95 del retardo de acceso aleatorio:** Se calcula para conocer el valor máximo del 95 % de los resultados, es decir, el 95 % de los resultados está por debajo del percentil calculado [87], [88]. El percentil 95 de RA corresponde al valor del dato ordenado en la posición  $P_{95}$ .

Para obtener este valor, primero se ordenan los datos de retardo de RA de forma ascendente y después se estima la posición del percentil 95 usando la fórmula (4.4)

$$P_{95} = \frac{95}{100} * N_{RA \text{ correctos}} \quad (4.4)$$

**Throughput:** Es una medida del desempeño de la red en términos de la cantidad de información transmitida efectivamente por unidad de tiempo [89].

$$R = \frac{N_{bits}}{T_{total}} [bps], \quad (4.5)$$

donde  $R$  es *throughput* en bps,  $N_{bits}$  es la cantidad de bits transmitidos efectivamente por la red y  $T_{total}$  es el tiempo de medición en segundos.

**Utilización de los PRBs:** Esta métrica tiene como función mostrar la utilización de los canales físicos ya que proporciona información de los recursos físicos consumidos. Se define como la división entre los PRBs usados y los disponibles en la red, así como lo evidencia la ecuación (4.6):

$$U_{PRBs} = \frac{PRBs_{usados}}{PRBs_{totales}}, \quad (4.6)$$

donde  $PRBs_{usados}$  es la suma de todos los PRBs empleados por los diferentes usuarios de la red y  $PRBs_{totales}$  es el número total de PRBs disponibles para ser asignados a los usuarios de la red.

**Error de estimación:** es una medida de la precisión de una variable. Cuanta más precisión se desee en la estimación de un parámetro, más estrecho deberá ser el intervalo de diferencia. Equivale al valor absoluto de la diferencia entre una estimación particular y el valor del parámetro.

Para analizar la precisión de la estimación de los algoritmos se contempla el promedio de la diferencia entre el tiempo ideal y el estimado para cada uno en los escenarios contemplados.

## 4.4 RESULTADOS

Se presenta la evaluación y análisis del impacto de las comunicaciones M2M en la provisión de QoS en el UL de las redes LTE/LTE-A cuando se utiliza la técnica de acceso LTE tradicional y la técnica de acceso híbrida. El planificador empleado fue el ZBQoS y la estimación de retardo en el UL, fue realizada con los algoritmos propuestos en [14] y [23].

Los gráficos presentados exponen los valores medios con intervalos de 95 % de nivel de confianza utilizando el método de replicación independiente<sup>20</sup> [90]. Todas las métricas de desempeño analizadas (descritas en la sección 4.3.4) se muestran en función del número de MTCDs activos en la simulación.

Los dos escenarios propuestos con sus diferentes casos de simulación arrojaron resultados válidos en redes LTE/LTE-A porque, aunque LTE-A se diferencia de LTE principalmente por usar agregación de portadora, esta característica no influye en la priorización de los usuarios para la planificación, por otro lado, el proceso de RA y envío de BSRs son los mismos para las dos tecnologías.

En la implementación de la estimación del retardo del paquete HoL los algoritmos desconocen si el UE ha descartado paquetes y en qué momento lo ha hecho, lo cual implica que el cálculo de ambos sea impreciso y por lo tanto, aumente el error de estimación.

### 4.4.1 Escenario 1: Acceso a la red por medio de LTE tradicional

#### 4.4.1.1 Proporción de paquetes perdidos

Estos resultados muestran la pérdida de paquetes de los cuatro casos de simulación en función del número de MTCDs activos en la red para los diferentes tipos de tráfico.

La Figura 4.1 evidencia un comportamiento creciente en todos los casos de simulación para los cinco tipos de tráfico, es decir que a mayor cantidad de MTCDs activos se presentan mayores pérdidas de paquetes en la red. Se aclara que los paquetes perdidos son aquellos generados en el UE que contienen datos de usuario y no alcanzaron a ser atendidos.

El porcentaje de pérdida de paquetes para tráfico de VoIP en ausencia de MTCDs supera la PLR permitida en los cuatro casos de simulación, tal y como lo presenta la Figura 4.1a. Lo anterior se explica porque todos los usuarios al intentar enviar mensajes en el UL realizan el proceso de RA para solicitar recursos, provocando un aumento de tiempo en el acceso a la red para el envío del BSR. Este tiempo en algunos casos supera el PDB de VoIP (ver Tabla 4-6) generando la pérdida de paquetes como se evidencia en la Figura 4.1a.

Las curvas en las Figuras 4.1b y 4.1c tienen un comportamiento similar, sin embargo, los datos mostrados confirman la prioridad que el planificador tiene por los paquetes de video sobre los de video no-GBR a causa del valor del QCI que maneja cada RB (2 para tráfico

---

<sup>20</sup> Se basa en la suposición de que las medias de las replicaciones son independientes a pesar de que las observaciones en una misma replicación estén correlacionadas. Cada replicación en la simulación se obtiene con un valor diferente de semilla [90].

de video y 7 para tráfico de video no-GBR) arrojando menores pérdidas para el tráfico de video.

Los tipos de tráfico de CBR y *Time-driven* son los que mayor porcentaje de pérdida de paquetes tienen, debido a que el planificador ZBQoS al ser *QoS-aware* prioriza RBs GBR sobre RBs no-GBR.

En la mayoría de los casos tanto el Algoritmo 1, Algoritmo 2 y no estimado tienen una mayor pérdida de paquetes respecto al retardo ideal. Sin embargo, después de 1000 MTCs para el tráfico de CBR, la PLR para los dos algoritmos proporcionan un porcentaje menor a los resultados del caso de retardo ideal. Esta excepción se justifica por la alta cantidad de paquetes descartados que tiene el tráfico de VoIP, video y video no-GBR, lo cual deja recursos libres en la red que son utilizados por el tráfico que no opera en tiempo real tal como CBR.

La diferencia entre los casos de simulación con retardo ideal y aquellos con retardo estimado se presenta debido al gran número de MTCs activos en la red.

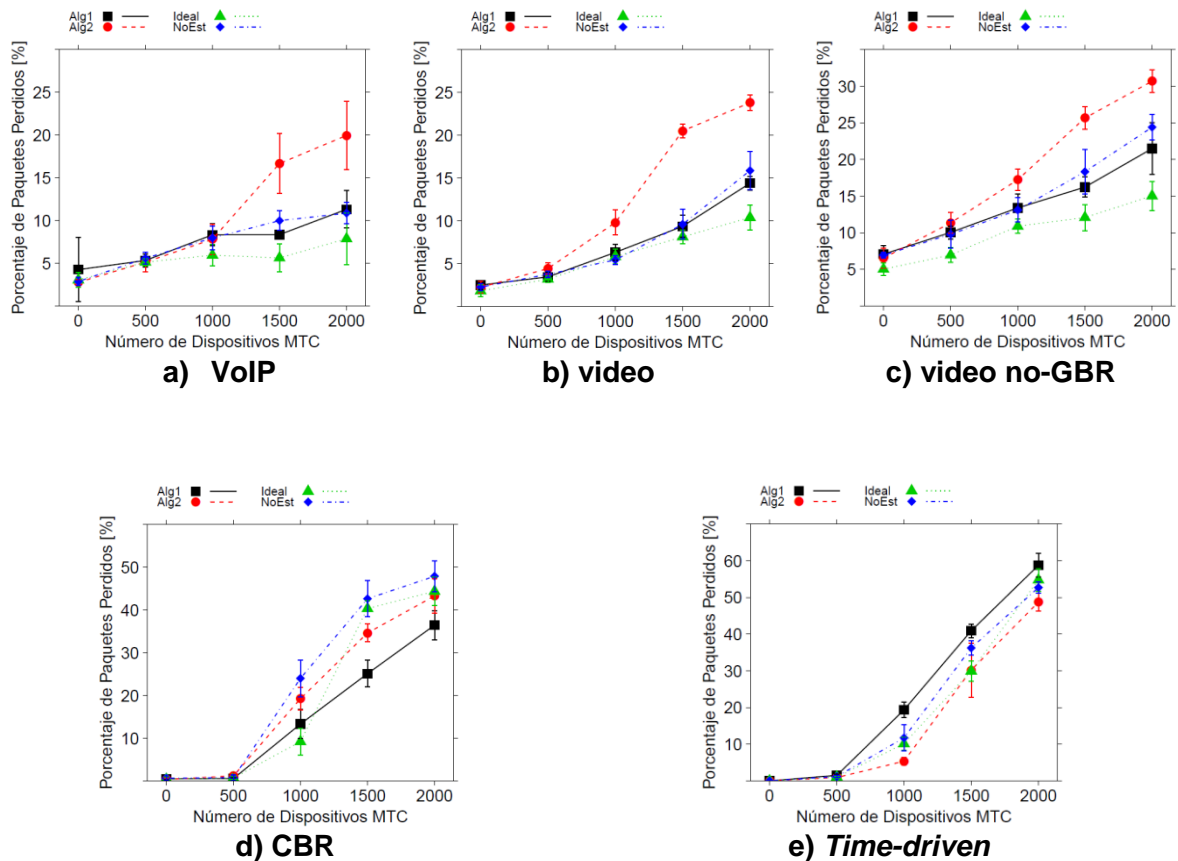


Figura 4.1 Porcentaje de paquetes perdidos mediante la técnica de acceso LTE tradicional.



#### 4.4.1.2 Retardo extremo a extremo

El retardo extremo a extremo en el tráfico de las aplicaciones en tiempo real, VoIP, video y video no-GBR, mostradas en las Figuras 4.2a, 4.2b y 4.2c respectivamente, el comportamiento es igual en los casos del Algoritmo 1 y no estimado, y es ligeramente menor en relación a los valores de referencia. Este comportamiento se explica porque en cuestiones de PLR (Figura 4.1), los resultados con el Algoritmo 1 (que son iguales a los del caso de no estimado) son más altos que los obtenidos con el retardo ideal, lo cual significa que la red tiene menos paquetes por atender, proporcionando mejores tiempos de procesamiento para aquellos que aún quedan en la red.

Por otra parte, los resultados para el tráfico de video y video no-GBR con el Algoritmo 2 exhiben que el retardo es estadísticamente igual al comportamiento que presenta la curva de retardo ideal. Comparando estos resultados con los de PLR, se observa que para este tipo de aplicaciones, Figuras 4.1b y 4.1c, los valores son significativamente diferentes con los dos tipos de retardo. Sin embargo, que el retardo extremo a extremo sea igual para estos dos casos se debe al alto error de estimación del Algoritmo 2 (ver subsección 4.4.1.6).

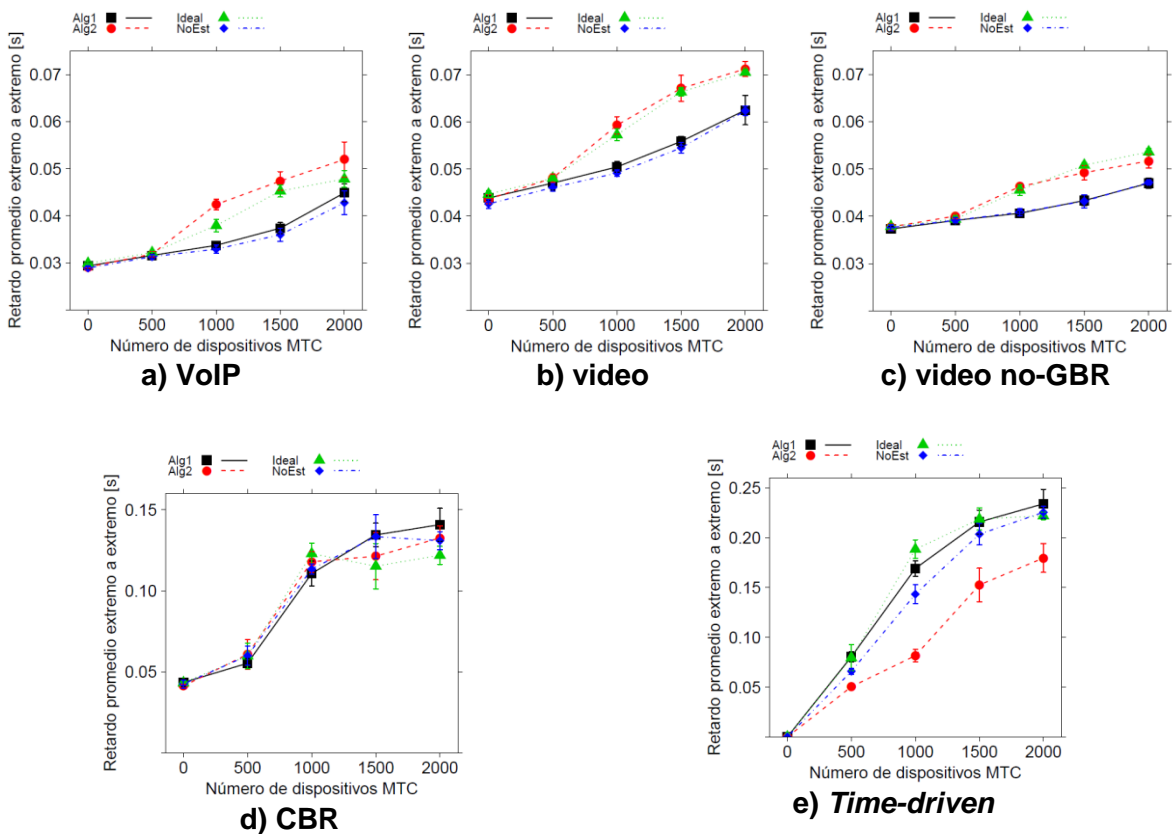


Figura 4.2 Retardo extremo a extremo usando la técnica de acceso LTE tradicional.

Las gráficas evidencian que para el tráfico de VoIP, video y video no-GBR el retardo extremo a extremo aumenta unos pocos ms a medida que aumentan los MTCDs. Caso contrario se presenta en las aplicaciones que no operan en tiempo real, CBR y *Time-driven* (Figuras 4.2d y 4.2e), donde los valores de retardo extremo a extremo aumentan considerablemente al incremento de MTCDs debido a la baja prioridad que tiene este tipo de tráfico, es decir que en congestión la red tarda más tiempo en atender estos paquetes.

En presencia de más de 1000 MTCDs, el retardo extremo a extremo es alto para los tráficos CBR y *Time-driven* comparado con el retardo del tráfico en tiempo real. Esta diferencia se presenta por el aumento de tiempo de los paquetes en cola debido a la gran cantidad de usuarios a ser planificados y la priorización que hace el planificador del tráfico en tiempo real sobre el resto de aplicaciones.

A pesar de estas variaciones, todas las aplicaciones se encuentran con un retardo por debajo de sus PDBs, especialmente las aplicaciones en tiempo real.

#### 4.4.1.3 Retardo promedio de acceso aleatorio

La Tabla 4-5 muestra el tiempo promedio que el UE ha empleado en realizar el proceso de RA cuando se emplea el retardo ideal. No se especifican datos para otros casos de simulación debido a que en este proceso la red aún no ha considerado ninguna estimación de retardo del paquete HoL y por tanto para todos los casos se obtienen resultados iguales.

El tráfico *Time-drive* aunque presenta el retardo de acceso más alto, corresponde a menos de una cuarta parte del valor de su PDB. Sin embargo, es la aplicación que experimenta las pérdidas más altas de todos los tipos de tráfico (Figura 4.1e) debido a que al ser no-GBR el planificador no lo prioriza.

Tabla 4-5 Retardo promedio de acceso aleatorio LTE tradicional (ms).

Aplicación	Retardo promedio de acceso aleatorio (ms)				
<b>VoIP</b>	35	39	41	43	45
<b>Video</b>	35	39	42	46	46
<b>Video no-GBR</b>	36	39	44	45	49
<b>CBR</b>	36	40	40	40	40
<b><i>Time-driven</i></b>	-	39	45	53	61
	<b>0</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>1500</b>	<b>2000</b>
	<b>Número de MTCDs activos</b>				

Los resultados obtenidos muestran que todas las aplicaciones tienen tiempos de RA bajos con respecto a los PDBs establecidos y no permiten visualizar el porqué de las pérdidas presentadas en la Figura 4.1.

#### 4.4.1.4 Percentil 95 del retardo de acceso aleatorio

La Tabla 4-6 presenta el percentil 95 del retardo de RA del escenario 1. Los resultados obtenidos para todos los tipos de tráfico tienen un comportamiento similar: los retardos incrementan conforme al aumento del número de MTCDs.

Tabla 4-6 Percentil 95 del retardo de acceso aleatorio LTE tradicional (ms).

Aplicación	Percentil 95 del retardo de acceso aleatorio (ms)				
<b>VoIP</b>	88	104	111	117	131
<b>Video</b>	91	105	113	128	132
<b>Video no-GBR</b>	92	102	116	132	141
<b>CBR</b>	94	103	103	102	105
<b>Time-driven</b>	-	85	99	114	141
	<b>0</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>1500</b>	<b>2000</b>
	<b>Número de MTCDs activos</b>				

El percentil 95 del retardo de RA obtenido arroja resultados que explican la alta pérdida de paquetes en las aplicaciones en tiempo real mostradas en la Figura 4.1, especialmente, la tendencia de incremento de la pérdida de paquetes con el aumento del número de MTCDs.

En los tráficos de VoIP y video no-GBR, hay usuarios que experimentan tiempos altos en el acceso comparados con su PDB. Por lo tanto, cuando un usuario de alguna de las dos aplicaciones obtiene los recursos necesarios para acceder a la red, probablemente, el paquete ya se ha descartado en el UE o por el contrario, le queda muy poco tiempo para el proceso de planificación.

Los valores de retardos altos en algunos accesos se deben al aumento de las disputas generadas por los dispositivos al escoger los preámbulos para realizar el RA. Es claro que a medida que aumenta el número de MTCDs, la probabilidad de colisión se incrementa debido a que hay más dispositivos compitiendo por los preámbulos. Esas colisiones retardan el acceso a la red, resultando en la repetición de procedimientos de RA hasta obtener recursos para transmitir en UL.

Los resultados del percentil 95 de retardo de RA para el tráfico de CBR y *Time-driven* muestran que el porcentaje excesivo de pérdida de paquetes no es causado por este retardo, ya que estos tiempos son bajos comparados con el PDB que cada tráfico maneja.

#### 4.4.1.5 Error de estimación del retardo

La Figura 4.3 presenta el error medio en la estimación del retardo para el Algoritmo 1 y Algoritmo 2 mediante la diferencia de tiempo que hay entre el valor calculado por cada uno y el valor ideal obtenido directamente del simulador. Esta figura muestra que en ausencia de MTCDs, los tiempos estimados por el Algoritmo 2 son más cercanos al ideal comparado con el Algoritmo 1, pero a medida que aumenta el número de MTCDs, el

Algoritmo 2 calcula tiempos más lejanos al retardo ideal proporcionando valores menos precisos que el Algoritmo 1.

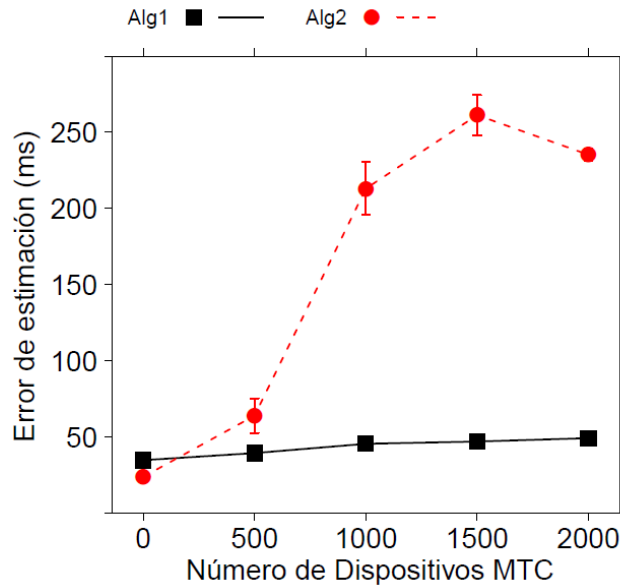


Figura 4.3 Error de estimación de los Algoritmos en el escenario 1.

La diferencia sustancial presentada con el Algoritmo 2 en presencia de comunicaciones M2M explica las altas pérdidas de paquetes presentadas por las aplicaciones en tiempo real para este caso (Figura 4.1).

La discrepancia de estimación entre los dos algoritmos se atribuye a las propiedades que cada uno tiene. El Algoritmo 2 realiza las estimaciones con la información de todos los BSR en el rango de los PDBs de las RBs, mientras que el Algoritmo 1 restringe la cantidad de BSRs que puede almacenar para cada RB (parámetro  $M$ ) limitando la estimación del retardo a los intervalos definidos por los BSRs almacenados.

El Algoritmo 2 tiene más información sobre la llegada de los BSRs al incrementar los MTCDs en la red. No obstante estos datos son imprecisos, pues el eNB solo considera la llegada de los BSRs y no cuando éstos fueron activados. Este hecho sumado a los retardos altos de acceso mostrados en la Tabla 4-6 introducen errores al tiempo de llegada de los BSRs, provocando un mayor error de estimación. Por su parte, el Algoritmo 1 al tener poca información, limita el rango del cálculo y por lo tanto el error de estimación.

#### 4.4.1.6 *Throughput* y utilización de PRB

La Figura 4.4a muestra el *throughput* de la red para el escenario 1. Los valores obtenidos con el caso de retardo ideal son mayores a todos los otros casos. Esto se debe a que este caso presenta la menor pérdida de paquetes para las aplicaciones en tiempo real mostradas en la Figura 4.1 y gracias a que tienen la mayor cantidad de *bytes* para transmitir, especialmente las aplicaciones de video.

Considerando que el *throughput* es el volumen de datos netos que fluye a través de la red, otra aplicación que aporta un tráfico considerable es CBR, situación contraria se presenta en *Time-driven* porque adiciona muy poco a esta métrica al enviar paquetes de tamaño generalmente pequeños.

Las curvas muestran congestión en la red después de 1000 MTCDs ya que a partir de este valor el rendimiento disminuye debido en gran medida a que la pérdida de paquetes del tráfico CBR aumenta considerablemente a partir de 1000 MTCDs como muestra la Figura 4.1d.

La Figura 4.4b muestra la utilización de los PRBs disponibles en la red. Esta métrica al igual que la del *throughput* está inversamente relacionada con la PLR, es decir, si existe una mayor o menor pérdida de paquetes, habrá una menor o mayor utilización de los PRBs.

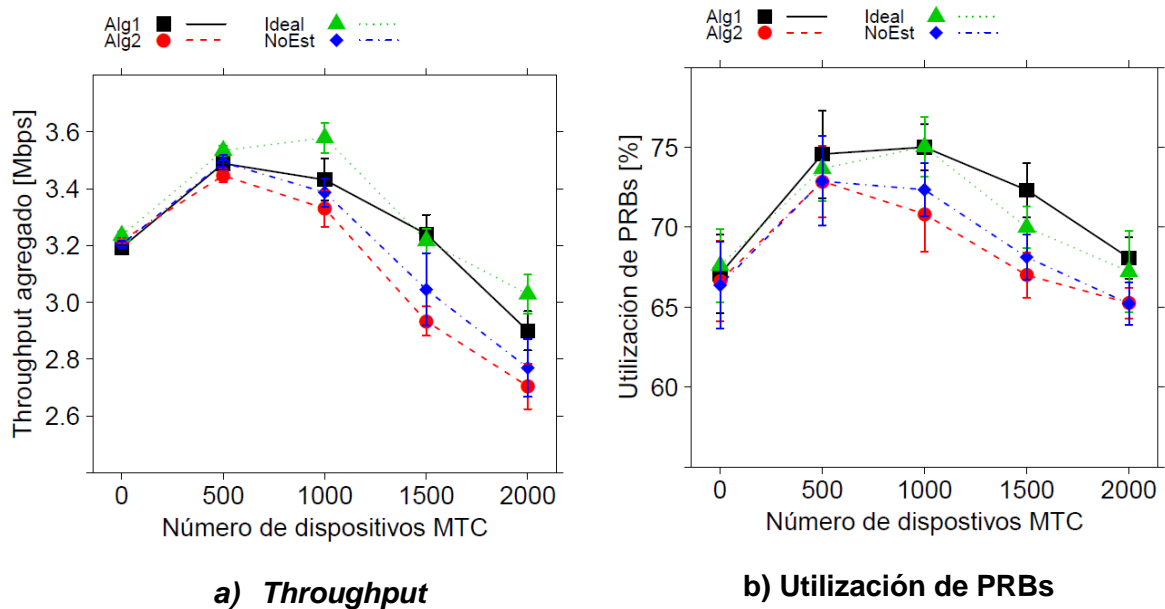


Figura 4.4 *Throughput* agregado y utilización de los PRBs disponibles con la técnica de LTE tradicional.

#### 4.4.2 Escenario 2: Acceso a la red por medio de técnica híbrida

##### 4.4.2.1 Proporción de paquetes perdidos

La Figura 4.5 presenta el porcentaje de paquetes perdidos para los diferentes tipos de tráfico en el escenario 2.

A medida que se incrementa la cantidad de usuarios MTC no hay un aumento significativo de PLR en el tráfico de VoIP, gracias a que, al haber recursos de acceso reservados para este tipo de tráfico, los usuarios de VoIP y video solo compiten entre ellos por los preámbulos reservados.

Por otro lado, la PLR del tráfico de video presenta un aumento hasta 1500 MTCDs en el caso de simulación no estimado y en 1000 MTCDs para los otros tres casos. Empíricamente se consideraba que el esquema híbrido aislaba totalmente el efecto de los MTCDs sobre las comunicaciones H2H. Sin embargo, el alza en la PLR se debe al consumo de recursos de control (Ver Anexo A) y de datos (Figura 4.8b), que incrementa el tiempo de atención afectando principalmente al tráfico con PDB pequeño como VoIP y video.

Las Figuras 4.5c, 4.5d y 4.5e muestran que la PLR de los tráficos de video no-GBR, CBR y *Time-driven* crece significativamente con el incremento de MTCDs. El aumento de la PLR se genera porque los tres tipos de tráfico compiten entre sí por el acceso a los recursos de datos y de control, dificultándose para todos el ingreso a la red. Además, no tienen priorización del planificador ZBQoS.

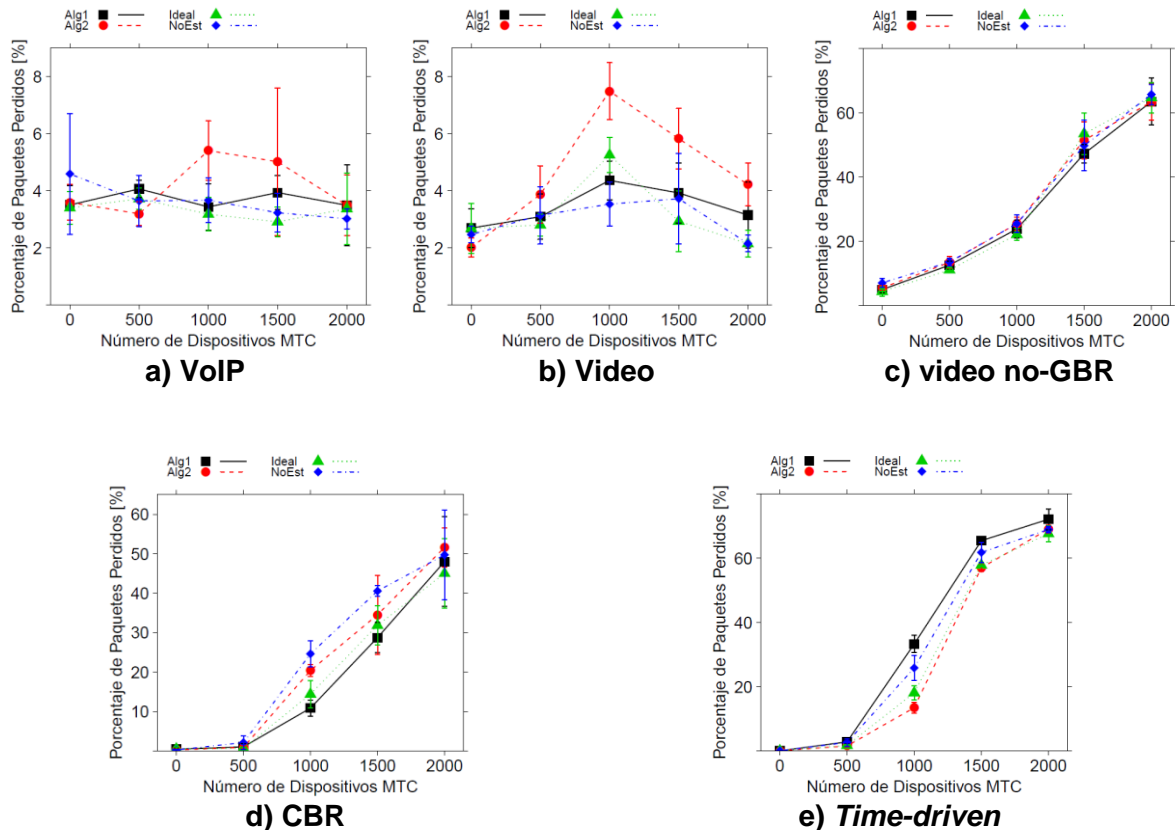


Figura 4.5 Porcentaje de paquetes perdidos mediante la técnica de acceso híbrida.

La pérdida de paquetes que arroja el Algoritmo 2 para el tráfico *Time-driven* (Figura 4.5e) es menor a los otros casos de simulación debido a la cantidad de recursos que no fueron utilizados por otras aplicaciones a causa de las altas perdidas de paquetes. Por lo tanto, los recursos no empleados quedan disponibles para ser usados por los MTCDs.

#### 4.4.2.2 Retardo extremo a extremo

Los resultados del retardo extremo a extremo se presentan en la Figura 4.6, todos los valores están dentro del PDB permitido para cada tipo de tráfico, destacándose que los paquetes provenientes de las aplicaciones en tiempo real presentan los retardos más bajos en presencia de una gran cantidad de MTCDs y, los tráficos de CBR y *Time-driven* (Figuras 4.6d y 4.6e) los valores más altos. Este comportamiento se debe al funcionamiento del planificador, pues prioriza el tráfico de las aplicaciones en tiempo real sobre las que no operan en tiempo real.

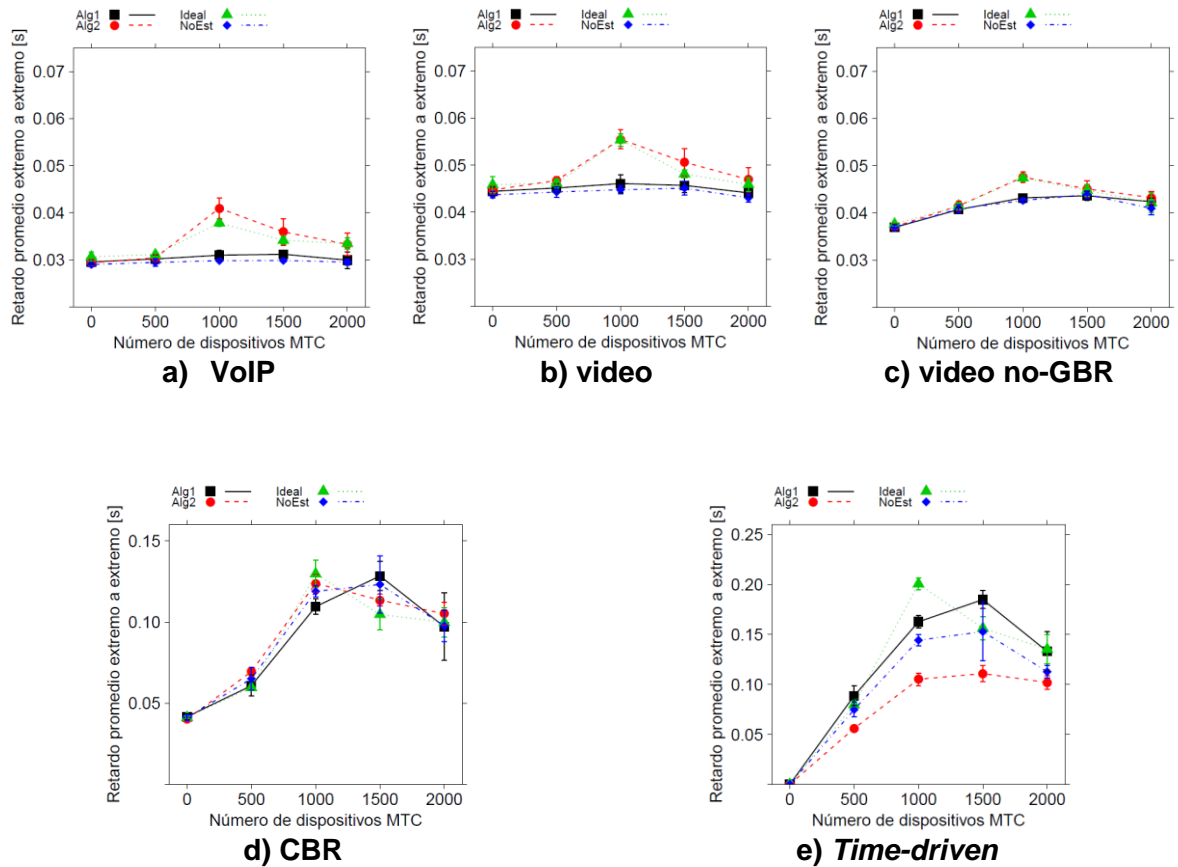


Figura 4.6 Retardo extremo a extremo usando la técnica de acceso aleatorio híbrida.

#### 4.4.2.3 Retardo promedio de acceso aleatorio

Los valores del retardo promedio del proceso de RA se muestran en la Tabla 4-7. Se evidencia que independientemente del número de MTCDs, para el tráfico de VoIP como para el de video, los tiempos se mantienen constantes y están dentro de los límites del PDB debido a que este tipo de tráfico tiene recursos reservados para el acceso a la red.

En los tráficos de video no-GBR, CBR y *Time-driven* el retardo de acceso promedio se incrementa levemente con el aumento de MTCDs activos en la red, sin embargo, teniendo

en cuenta el PDB de cada uno, estos tiempos están en el rango de las cotas definidas, lo que significa que los mensajes aún tienen tiempo para realizar el proceso de planificación.

Tabla 4-7 Retardo promedio de acceso aleatorio híbrido (ms).

Aplicación	Retardo promedio de acceso aleatorio (ms)				
<b>VoIP</b>	35	35	35	35	35
<b>Video</b>	37	36	36	35	35
<b>Video no-GBR</b>	34	45	63	63	58
<b>CBR</b>	33	44	43	58	58
<b>Time-driven</b>	-	46	84	196	203
	<b>0</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>1500</b>	<b>2000</b>
	<b>Número de MTCDs activos</b>				

#### 4.4.2.4 Percentil 95 del retardo de acceso aleatorio

La Tabla 4-8 contiene los valores de retardo obtenidos en el acceso aleatorio del 95 % de los resultados del escenario 2.

Para los tipos de tráfico no-GBR, que en la simulación son las aplicaciones con QCI mayor a 5, las mediciones tienen una tendencia al alza a medida que aumenta la cantidad de MTCDs en la red y son mayores comparados con los del tráfico GBR debido a que la división de los recursos de acceso proporciona pocos preámbulos a las portadoras no-GBR teniendo en cuenta la gran cantidad de MTCDs que intentan acceder.

En los tráficos de video no-GBR y *Time-driven* el retardo de RA supera su PDB a partir de 500 y 1500 MTCDs respectivamente conllevando a la pérdida de estos paquetes.

Tabla 4-8 Percentil 95 del retardo de acceso aleatorio híbrido (ms).

Aplicación	Percentil 95 del retardo de acceso aleatorio (ms)				
<b>VoIP</b>	91	91	90	90	90
<b>Video</b>	92	91	91	90	91
<b>Video no-GBR</b>	88	126	198	194	175
<b>CBR</b>	89	124	121	140	151
<b>Time-driven</b>	-	94	201	517	518
	<b>0</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>1500</b>	<b>2000</b>
	<b>Número de MTCDs activos</b>				

El alto retardo de acceso es razón por la cual al continuar el proceso de planificación se presentan grandes PLRs ya que los tiempos de los paquetes HoL no son calculados de forma exacta en los casos de Algoritmo 1, Algoritmo 2 y no estimado. De esta manera, el tiempo restante que tiene un usuario para ser planificado antes de cumplir su PDB es pequeño y la información del retardo utilizada en la planificación es imprecisa.



#### 4.4.2.5 Error de estimación del retardo

La Figura 4.7 presenta el error de estimación de los algoritmos en el escenario 2. Teniendo en cuenta que los procesos ejecutados por los algoritmos son los mismos a los del escenario 1 la justificación del comportamiento del error de estimación es igual a la sección 4.4.1.5.

Sin embargo, como los usuarios de las aplicaciones GBR tienen asegurada QoS debido a los recursos reservados en el acceso aleatorio, los paquetes descartados son menores a los del escenario 1. Como consecuencia, los valores de error de estimación obtenidos para el Algoritmo 2 comparados con el escenario 1, son más bajos ya que al haber menos descarte de paquetes el cálculo es más preciso.

Esta métrica es una justificación por la cual la pérdida de paquetes es más alta cuando se usan estos dos algoritmos. En el caso del Algoritmo 2, la pérdida de paquetes mostrada en la Figura 4.5 para los tráficos de VoIP, video, video no-GBR y CBR con más de 1000 usuarios es mayor a la del Algoritmo 1, debido a que el error de estimación influye en el cálculo del retardo de HoL y por lo tanto en el descarte de paquetes.

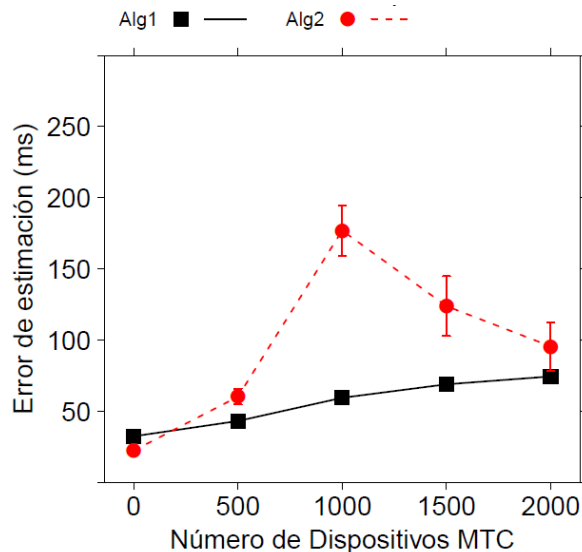


Figura 4.7 Error de estimación de los Algoritmos 1 y 2 usando la técnica de acceso híbrida.

#### 4.4.2.6 Throughput y utilización de PRB

El desempeño general de la red se muestra en la Figura 4.8. El *throughput* aumenta hasta 500 MTCs y a partir de los 1000 MTCs disminuye. Esto se explica por las altas pérdidas de paquetes presentadas en los tráficos de video no-GBR y CBR que son los que más aportan en esta métrica.

El uso de los algoritmos afecta el *throughput* de la red, disminuyéndolo con respecto al del caso de retardo ideal. Para este escenario la diferencia en las curvas es poca, sin embargo se debe a que mediante el uso de estos la pérdida de paquetes para los diferentes tráficos es más representativa en los no-GBR.

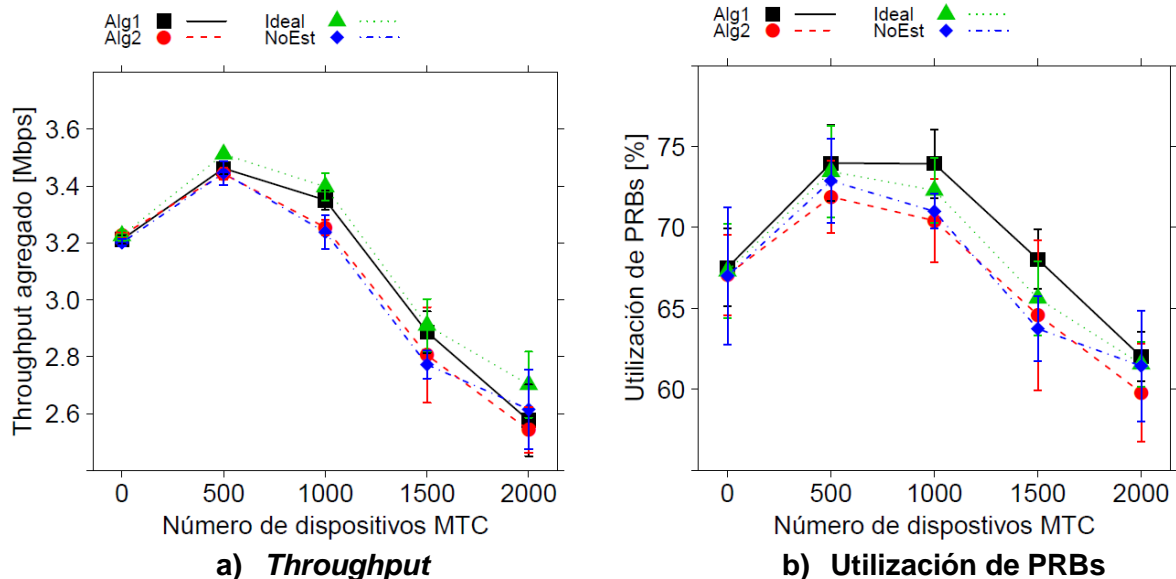


Figura 4.8 *Throughput* agregado y utilización de los PRBs disponibles con la técnica de acceso híbrida.

En cuanto a la utilización de PRBs como lo muestra la Figura 4.8b no se utiliza el 100 % de estos sino que varía en un rango entre 60 y 80 %, es decir nunca se presenta el caso de saturación en el PUSCH. Se observa que existe un punto pico en la presencia de 1000 MTCs y que a partir de este, los valores decaen. Esta disminución se genera por las colisiones en el PRACH ocasionadas por el alto número de terminales intentando acceder, lo cual deja disponibilidad de recursos (PRBs) en la red porque no hay dispositivos con acceso que los utilicen.

#### 4.4.3 Comparación de los resultados de ambos escenarios

Teniendo en cuenta los resultados presentados para ambos escenarios, analizando sus similitudes y diferencias, se tiene la siguiente comparación:

- ✓ Las razones más relevantes que explican los altos porcentajes de PLR son el tiempo que tardan los dispositivos en el intento de acceso a la red por cualquiera de las 2 técnicas y la priorización de las RBs GBR que hace el planificador ZBQoS afectando los tráficos de video no-GBR, CBR y *Time-driven*.
- ✓ Con respecto a la PLR, usando la técnica tradicional de acceso LTE (escenario 1), la proporción de pérdida de paquetes tiene un comportamiento creciente para todos los tipos de tráfico utilizados. En cambio con la técnica de acceso híbrida (escenario 2) está no tiene un comportamiento incremental significativo con el aumento de usuarios MTC en la red para las aplicaciones de VoIP y video.
- ✓ La PLR en las aplicaciones no-GBR de los dos escenarios aumenta conforme incrementa el número de MTCs.

- ✓ Comparando el percentil 95 del retardo de RA de los dos escenarios, los únicos tipos de tráfico donde no aumenta el retardo son VoIP y video mediante el uso de la técnica de acceso híbrida (escenario 2).
- ✓ Los resultados del retardo extremo a extremo muestran que los tráficos de VoIP, video y video no-GBR en el escenario 1 incrementan, y en el escenario 2 se mantienen constantes para los tres tipos de tráfico.
- ✓ El rendimiento de la red evaluado con el *throughput* y la utilización de PRBs se asemeja en los dos escenarios y la congestión de la red se evidencia para ambos después de 1000 MTCDs.

## 5. CAPÍTULO CINCO. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Las conclusiones y recomendaciones obtenidas de la realización de este trabajo de grado se presentan a continuación. Además, se proponen trabajos futuros al tema relacionado.

### 5.1. CONCLUSIONES

- ✓ La implementación de los algoritmos de estimación del retardo del paquete HoL de [14] y [23] en el UL de redes LTE/LTE-A con comunicaciones M2M proporcionan al eNB datos útiles para garantizar QoS a las aplicaciones que operan en tiempo real.
- ✓ La estimación del retardo del paquete HoL obtenida mediante la implementación de los dos algoritmos presentados en este trabajo brinda una información complementaria a la definida por el 3GPP, ya que la norma no contempla el envío de este tiempo en ninguna especificación.
- ✓ Las comunicaciones masivas M2M desplegadas en una red LTE/LTE-A con acceso tradicional impactan negativamente la QoS de las aplicaciones en tiempo real ya que en sobrecarga la pérdida de paquetes supera los límites permisibles afectando las comunicaciones presentes.
- ✓ El uso de la técnica de acceso híbrida permite que las comunicaciones masivas M2M sobre el UL de una red LTE/LTE-A no afecten el tráfico GBR ya que mediante esta técnica se reserva recursos en el acceso aleatorio para los usuarios de VoIP y video garantizando QoS independientemente de la cantidad de MTCDs activos.
- ✓ Los resultados muestran que es necesario la implementación de esquemas de control de congestión en el acceso a las redes LTE/LTE-A que soporten la coexistencia de los usuarios H2H y dispositivos M2M, y además satisfagan los requerimientos de QoS de los dos tipos de comunicación.
- ✓ El proceso de RA es importante en la asignación eficiente de los recursos en redes LTE/LTE-A cuando soporta las comunicaciones M2M. Esto debido a que el retardo de RA impacta en la provisión de QoS para todo tipo de usuarios y en especial a los que operan en tiempo real.
- ✓ El aumento de MTCDs disminuye el rendimiento de la red a causa de las altas pérdidas de paquetes que se presentan cuando hay congestión.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- Se sugiere realizar un estudio previo en la selección de la herramienta de simulación de forma que se pueda ejecutar de manera próxima a un entorno real acorde a las necesidades del proyecto.
- Se recomienda definir estrictamente parámetros y métricas del proyecto de simulación con el fin de adecuar los escenarios al caso de estudio.
- Es necesario poseer conocimientos intermedios de lenguaje C++ cuando se trabaja con LTE-Sim, dado que este es el lenguaje de programación utilizado por el simulador y generalmente se requiere de modificación y creación de código adicional para satisfacer necesidades particulares.
- Se recomienda hacer un diagrama de flujo de los procesos y funciones principales de la herramienta de simulación para identificar los módulos que se deben modificar o crear para el desarrollo de una necesidad específica.
- Las soluciones al control de sobrecarga definidas por 3GPP no establecen específicamente los parámetros y valores a utilizar, por lo tanto se recomienda un estado del arte de los resultados de los trabajos existentes con el fin de elegir los más apropiados.

## 5.3. TRABAJOS FUTUROS

- Plantear esquemas adicionales de control de sobrecarga en el acceso a la red teniendo en cuenta la importancia de mantener la provisión de QoS a los tráficos en tiempo real en redes LTE/LTE-A operando con comunicaciones masivas M2M.
- Estudiar el comportamiento del despliegue de las comunicaciones M2M sobre redes LTE/LTE-A en un escenario donde cada uno de los usuarios H2H soporten varios servicios a la vez.
- Analizar el impacto en la provisión de QoS en redes LTE/LTE-A para una aplicación específica de M2M, considerando las características de la misma en un entorno real con sus requisitos de QoS.
- Agregar al análisis del comportamiento de la red LTE/LTE-A otros tipos de tráfico M2M tales como *Query-driven* y *Event-driven*.
- Enfocar el trabajo en la búsqueda del equilibrio o relación de usuarios H2H y M2M para la coexistencia en una red LTE, garantizando QoS para ambas comunicaciones.

## ANEXOS

### ANEXO A. UTILIZACIÓN DE ELEMENTOS DEL CANAL DE CONTROL

El canal PDCCH transporta los DCI formados por Elementos del Canal de Control (CCE, *Control Channel Element*).

El número de CCEs usados para la transmisión de un mensaje DCI al UE es conocido como nivel de agregación, los cuales pueden ser uno, dos, cuatro, u ocho. Cada CCE corresponde a nueve conjuntos de cuatro parámetros o informaciones relacionadas con la capa física. Por ejemplo, en un CCE se puede transmitir la cantidad de recursos asignados, el MCS utilizado, los datos relacionados al control de potencia del UL, la información sobre H-ARQ, la identificación del dispositivo a quien va dirigido los datos y *grants*, etc. [4].

El número de CCEs asignados a un PDCCH lo determina cada eNB en función de las condiciones del canal, el número de retransmisiones efectuadas en el UL, y los recursos de señalización y control necesarios para transmitir los mensajes ACK/NACK en el DL.

La cantidad limitada de CCEs ocupados y el nivel de agregación pueden tener un gran efecto en el desempeño de la red. Esta restricción establece cuántos mensajes DCI pueden ser transmitidos por un eNB [91].

La Figura A.1 presenta el porcentaje de CCEs utilizados en los dos escenarios de simulación.

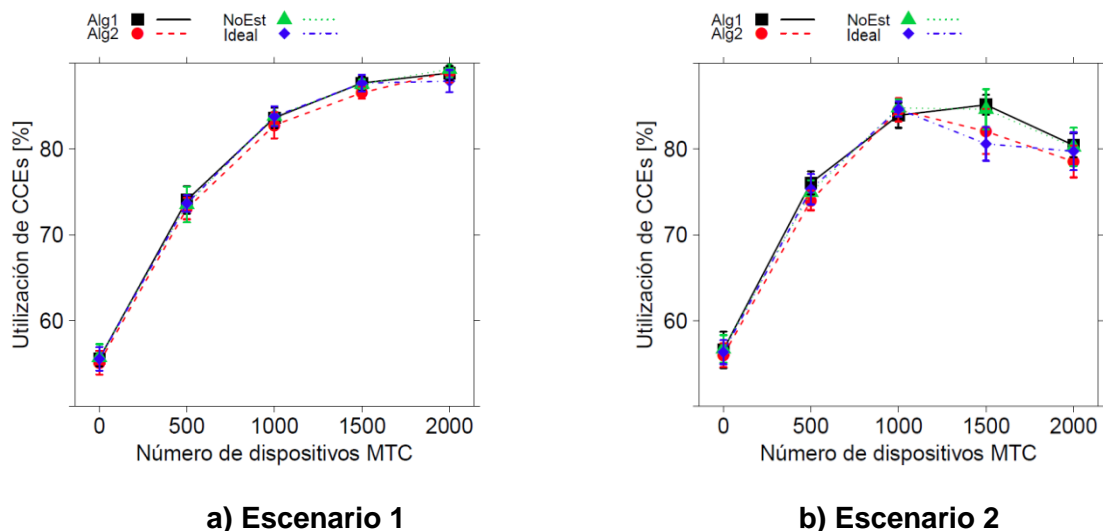


Figura A.1 Utilización de CCEs para los dos escenarios.

La utilización de CCEs incrementa conforme al aumento de los dispositivos M2M en la red para el escenario 1 (Figura A.1a), alcanzando más del 85 % cuando hay 2000 MTCDs. Esto es consecuencia del consumo de recursos de los mensajes de RA y de control para la transmisión de datos sobre el PUSCH. El aumento en el consumo de los recursos de control es uno de los principales problemas cuando una gran cantidad de MTCDs comparten la celda con usuarios H2H, ya que estos son limitados.

Para el escenario 2, la utilización de CCEs decrece levemente después de 1500 MTCDs debido a la alta pérdida de paquetes (Figuras 4.5c, 4.5d y 4.5e) del tráfico no-GBR.

En ninguno de los dos escenarios, ni el PUCCH ni el PUSCH fueron congestionados en las simulaciones y los recursos para transmisiones de control y datos estuvieron disponibles. Por esta razón, la pérdida de paquetes que se produce es debido al procedimiento de RA en el PRACH.

## REFERENCIAS

- [1] M. Baker, "LTE - Advanced Physical Layer," 3GPP, Beijing, CN, REV-090003r1, Dic, 2009.
- [2] I. Siomina and S. Wanstedt, "The impact of QoS support on the end user satisfaction in LTE networks with mixed traffic," *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008. IEEE 19th International Symposium on*. IEEE, Cannes, pp. 1–5, 2008.
- [3] "Introducción a LTE," class notes for Sistemas comunicaciones móviles de tercera y cuarta generación, Dept. of Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, CO, 2013.
- [4] F. Bernardo, F. Casadevall, and O. Sallent, *LTE Nuevas tendencias en comunicaciones móviles*. Cataluña, ES: Fundación Vodafone España, 2010.
- [5] Cisco, "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2014-2019 White Paper," vol. 2015, no. 4, pp. 2014–2019, 2015.
- [6] ETSI, "Machine-to-Machine communications (M2M); M2M service requirements," ETSI, Sophia Antípolis, FR, ETSI TS 102 689 V1.1.1, Aug. 2010.
- [7] S.-Y. Lien, K.-C. Chen, and Y. Lin, "Toward ubiquitous massive accesses in 3GPP machine-to machine communications," *Commun. Mag.*, vol. 49, no. IEEE, p. 66,74, 2011.
- [8] C. A. Astudillo, J. F. Borin, and N. L. S. Da Fonseca, "LTE time-domain uplink scheduler for QoS provisioning," *GLOBECOM - IEEE Glob. Telecommun. Conf.*, pp. 1458–1463, 2013.
- [9] T. P. C. De Andrade, G. S. Member, C. A. Astudillo, and G. S. Member, "Allocation of Control Resources for Communications over LTE / LTE-A Networks," *INTERNET THINGS JOURNAL, IEEE*, vol. 2, no. 5, pp. 1–10, 2015.
- [10] LTE: la evolución de la red móvil de acceso. (n.d.). Centro Tecnológico de Telecomunicaciones de Galicia. [Online]. Available: <http://www.gradiant.org/es/actualidad/noticias/171-lte-la-evolucion-de-la-red-movil-de-acceso.html>. [Accessed: 13-Aug-2015].
- [11] Y. Gao and G. Liu, "Two-level buffer state report scheme for 3GPP LTE system," *Proc. - 5th Int. Conf. Wirel. Commun. Netw. Mob. Comput. WiCOM 2009*, no. 28, 2009.



- [12] “Gestión de Recursos Radio Contenido,” class notes for Sistemas de comunicaciones móviles de tercera y cuarta generación, Dept. of Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, CO, 2013.
- [13] S. Ramon, “QoS–Control de Admisión Uplink en Long Term Evolution,” Thesis. Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, ES, 2012.
- [14] N.-H. Lee and S. Kwon, “Uplink QoS Scheduling Algorithm with Delay Estimation for LTE Systems,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 80, no. 3, pp. 1131–1146, 2014.
- [15] J. Marjamaa, “A measurement-based analysis of machine-to-machine communications over a cellular network,” M.S. thesis, Dept. Comm. and Net., Aalto Univ., Espoo, FI, 2012.
- [16] A. Biral, M. Centenaro, A. Zanella, L. Vangelista, and M. Zorzi, “The challenges of M2M massive access in wireless cellular networks,” *Digit. Commun. Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 1–19, 2015.
- [17] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *The UMTS Long Term Evolution from theory to practice*. 2<sup>nd</sup> ed. Chippingham, UK: JohnWiley & Sons Ltd, 2011.
- [18] M. Nohrborg. (2008). LTE Overview. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>. [Accessed: 25-Aug-2015].
- [19] F. Firmin. (n.d.). The Evolved Packet Core. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core>. [Accessed: 8-Aug -2015].
- [20] ETSI, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): User Equipment (UE) radio access capabilities.” ETSI, Sophia Antípolis, FR, ETSI TS 136 306 V11.4.0, Sept. 2013.
- [21] ETSI, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN).” ETSI, Sophia Antípolis, FR, ETSI TS 136 300 V9.4.0, Jul. 2010.
- [22] ETSI, “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and,” ETSI, Sophia Antípolis, FR, ETSI TS 136 104 V9.4.0, Jul. 2010.
- [23] Y. Tan, “Active Queue Management for LTE uplink in eNodeB,” M.S. thesis, Dept. Comm. and Net., Helsinki Univ. of technology, Espoo, FI, 2009.
- [24] ETSI, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Physical channels and modulation,” ETSI, Sophia Antípolis, FR, ETSI TS 136 211 V10.0.0, Jan. 2011.

- [25] ETSI, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification," ETSI, Sophia Antipolis, FR, ETSI TS 136.323, Apr. 2015.
- [26] ETSI, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Link Control (RLC) protocol specification," ETSI, Sophia Antipolis, FR, ETSI TS 136 322 V12.1.0, Sept. 2014.
- [27] 3GPP, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Medio Access Control (MAC)", 3rd Generation Partnership Project (3GPP), TS 36.321.
- [28] J. G. Remy and C. Letamendia, "LTE Standards and Architecture, in LTE Standards," John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2014.
- [29] J. Milos and S. Hanus, "Simulation of UCI transmission via PUCCH in LTE uplink," in *Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), 2014 24th International Conference*, vol., no., pp.1-4, 15-16 Apr. 2014.
- [30] C. I. Calle Cáceres, "Estudio y análisis técnico comparativo entre las tecnologías 4G Long Term Evolution (LTE) y LTE Advanced," Thesis, Fac. Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, EC, 2013.
- [31] J. Wannstrom. Carrier Aggregation explained. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/101-carrier-aggregation-explained>. [Accessed: 13-Sept-2015].
- [32] Agilent Technologies. (2009). *3GPP Long Term Evolution: System Overview, Product Development, and Test Challenges*. [Online]. Available: <http://www.ccontrols.ch/cms/upload/applikationen/LTE/5989-8139EN.pdf>. [Accessed: 1-Jul-2015].
- [33] M. Hasan, E. Hossain, and D. Niyato, "Random access for machine-to-machine communication in LTE-advanced networks: issues and approaches," in *Communications Magazine, IEEE*, vol.51, no.6, pp.86-93, Jun. 2013.
- [34] T.P.C. de Andrade, C.A. Astudillo and N.L.S. Da Fonseca, "Random access mechanism for RAN overload control in LTE/LTE-A networks," in *Communications (ICC), 2015 IEEE International Conference on*, vol., no., pp.5979-5984, 8-12 Jun. 2015.
- [35] T.P.C de Andrade, C.A. Astudillo, and N.L.S. Da Fonseca, "The impact of massive machine type communication devices on the access probability of human-to-human users in LTE networks," in *Communications (LATINCOM), 2014 IEEE Latin-America Conference on*, vol., no., pp.1-6, 5-7 Nov. 2014.

- [36] B. Y. Cho. (2012 Mayo). LTE RRC/RRM. May. Nokia Siemens Networks. Seúl. Corea del Sur. [Online]. Available: [http://student.telum.ru/images/7/78/09-LTE\\_RRC.pdf](http://student.telum.ru/images/7/78/09-LTE_RRC.pdf). [Accessed: 8-Sept-2015].
- [37] H. Patel. (2013, Aug. 3). RRM functions. [Online]. Available: <http://lteuniversity.blogspot.com.co/2012/08/rrm-functions.html>. [Accessed: 8-Jul-2015].
- [38] C. A. Astudillo, "Provisão de Qualidade de Serviço em Redes Integradas LTE-EPON," M.S. thesis, IC, UNICAMP, Campinas, BR, 2015.
- [39] ETSI, "Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Service requirements for Machine-Type Communications (MTC); Stage 1," 3GPP-ETSI, FR, ETSI TS 122.268 v12.4.0, 2014.
- [40] IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, "IEEE 802.16p Machine to Machine (M2M) System Requirements Document (SRD)." 2011.
- [41] ETSI TS 102 689 V1.1.1, "Machine-to-Machine communications (M2M); M2M service requirements," 2010.
- [42] M. Steinheimer, U. Trick, W. Fuhrmann, M. Steinheimer, and B. Ghita, "P2p-based community concept for M2M applications," *Second Int. Conf. Futur. Gener. Commun. Technol. (FGCT 2013)*, pp. 114–119, 2013.
- [43] K. Zheng, F. Hu, W. Wang, W. Xiang, and M. Dohler, "Radio resource allocation in LTE-advanced cellular networks with M2M communications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 7, pp. 184–192, 2012.
- [44] A. Pergis, M. Kritis, I. Greek, F. Journal, and H. Society, "Congestion Control in LTE-based Machine Type Communication," vol. 5, no. 5, pp. 2005–2007, 2001.
- [45] T. Taleb, A. Kunz, "Machine type communications in 3GPP networks: potential, challenges, and solutions," in *Communications Magazine, IEEE*, vol.50, no.3, pp.178-184, Mar. 2012.
- [46] Aplicaciones y Servicios M2M. (2014.). TCP – USTGlobal. [Online]. Available: <http://www.tcpsi.com/servicios/m2m.htm>. [Accessed: 23-Jul-2015].
- [47] 3GPP, "Technical Specification Group Radio Access Network; Study on RAN Improvements for Machine-type Communications," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), TR 37.868, Sept. 2011.
- [48] ETSI TR 102 691 - V1.1.1, "Machine-to-Machine communications (M2M); Smart Metering Use Cases," vol. 1, pp. 1–49, 2010.

- [49] IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, "Machine to Machine (M2M) Communications Technical Report." 2010.
- [50] 3GPP, "Study on Facilitating Machine to Machine Communication in 3GPP Systems," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), TR 22.868, Mar. 2007.
- [51] N. Abu-Ali, A. E. M. Taha, M. Salah, and H. Hassanein, "Uplink Scheduling in LTE and LTE-Advanced: Tutorial, Survey and Evaluation Framework," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1239–1265, 2013.
- [52] P. Lescuyer and T. Lucidarme, *Evolved Packet System (Eps): The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS*. Chippenham, UK: Wiley, 2008, 350.
- [53] C. E. Guinand Salas and A. Umbert Juliana, "Planificación de una red lte con la herramienta atoll y análisis del impacto de las estrategias de packet scheduling," Thesis, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya, Cataluña, ES, 2012.
- [54] V. E. P. Orobio, H. J. Hurtado, "Análisis de la planificación de paquetes en el enlace descendente sobre el desempeño de una red LTE," Universidad del Cauca, 2015.
- [55] A. ReyhaniMasoleh, "Resource Allocation In Uplink Long Term Evolution," M.S. thesis, Escuela de estudios de grado y postdoctorales, University of Western Ontario, Ontario, CA, 2013.
- [56] N. M. El-shennawy and M. M. Fahmy, "A Channel-Aware Uplink Scheduling Algorithm for Mobile WiMAX Networks," *IWCMC 2014 - 10th Int. Wirel. Commun. Mob. Comput. Conf*, pp. 180–185, 2014.
- [57] Ruiz de Temino, L.; Berardinelli, Gilberto; Frattasi, S.; Mogensen, P., "Channel-aware scheduling algorithms for SC-FDMA in LTE uplink," in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008. IEEE 19th International*.
- [58] F. Bendaoud, M. Abdennebi, and F. Didi, "Survey on Scheduling and Radio Resources Allocation in LTE," *Int. J. Next-Generation Networks*, vol. 6, no. 1, pp. 17–29, 2014.
- [59] W. K. Lai and C. L. Tang, "QoS-aware downlink packet scheduling for LTE networks," *Comput. Networks*, vol. 57, no. 7, pp. 1689–1698, 2013.
- [60] S. M. Y. Adi, K. Wee, E. M. A, and F. A. A. Mohd, "Performance Study of Channel-QoS Aware Scheduler in LTE Downlink Using NS3," no. c, pp. 44–49, 2015.
- [61] S. Cicalo and V. Tralli, "Fair resource allocation with QoS support for the uplink of LTE systems," in *Networks and Communications (EuCNC), 2015 European Conference on*, vol., no., pp.180-184, Jun. 29 2015-Jul. 2 2015.

- [62] S. Nawaz, K. Marwat, T. Weerawardane, Y. Zaki, C. Goerg, and A. Timm-giel, "Performance Evaluation of Bandwidth and QoS Aware," In *Wired/Wireless Internet Communication*, pp. 298–306, 2012.
- [63] S. N. K. Marwat, Y. Zaki, C. Goerg, T. Weerawardane, and A. Timm-Giel, "Design and performance analysis of bandwidth and QoS aware LTE uplink scheduler in heterogeneous traffic environment," *IWCMC 2012 - 8th Int. Wirel. Commun. Mob. Comput. Conf.*, pp. 499–504, 2012.
- [64] M. Kalil, A. Shami, and A. Al-Dweik, "QoS-Aware Power-Efficient Scheduler for LTE Uplink," in *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, vol.14, no.8, pp.1672-1685, Aug. 1 2015.
- [65] J. Ding, A. Roy, and N. Saxena, "Smart M2M uplink scheduling algorithm over LTE," *Elektron. ir Elektrotehnika*, vol. 19, no. 10, pp. 138–144, 2013.
- [66] H. Safa and K. Tohme, "LTE uplink scheduling algorithms: Performance and challenges," *2012 19th Int. Conf. Telecommun.*, no. lct, pp. 1–6, 2012.
- [67] N. Afrin, J. Brown, and J. Y. Khan, "A delay sensitive LTE uplink packet scheduler for M2M traffic," *2013 IEEE Globecom Work. GC Wkshps 2013*, pp. 941–946, 2013.
- [68] 3GPP, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), TS 36.321, Aug. 2015.
- [69] SR (Scheduling Request). (n.d.). Sharetechnote. [Online]. Available: [http://www.sharetechnote.com/html/Handbook\\_LTE\\_SR.html](http://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_SR.html). [Accessed: 30-Jul-2015].
- [70] UL Grant. (n.d.). Sharetechnote. [Online]. Available: [http://www.sharetechnote.com/html/Handbook\\_LTE\\_ULGrant.html](http://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_ULGrant.html). [Accessed: 6-Aug-2015].
- [71] Tips for Basic Procedures. (n.d.). Sharetechnote. [Online]. Available: [http://www.sharetechnote.com/html/BasicProcedures\\_LTE.html](http://www.sharetechnote.com/html/BasicProcedures_LTE.html). [Accessed: 10-Jun-2015].
- [72] A. Pokhariyal, K. I. Pedersen, G. Monghal, I. Z. Kovacs, and C. Rosa, "HARQ aware frequency domain packet scheduler with different degrees of fairness for the UTRAN long term evolution," *Veh. Technol. Conf. VTC2007-Spring*, IEEE, pp. 2761–2765, 2007.
- [73] ns-3. (n.d.). nsnam. [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/>. [Accessed: 3-Sept-2015].
- [74] ns-3 Models. (n.d.). nsnam. [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/docs/release/3.21/models/html/lte-design.html#lte-mode>. [Accessed: 30-Aug-2015].

- [75] Opnet Application and Network Performance. (n.d.). opnet. [Online]. Available: [https://www.opnet.com/university\\_program/itguru\\_academic\\_edition/](https://www.opnet.com/university_program/itguru_academic_edition/). [Accessed: 2-Sept-2015].
- [76] What is SimuLTE: simulator for LTE networks. (n.d.). Simulte. [Online]. Available: <http://simulte.com/>. [Accessed: 28-Sept-2015].
- [77] G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, F. Capozzi, and P. Camarda, "Simulating LTE Cellular Systems : an Open Source Framework," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 2, pp. 498–513, 2011.
- [78] J. J. Black, L. Technicon, and R. Klungle, "Simulation Methodology -- a Practitioner' S Perspective," *Int. J. Ind. Eng. Apl. Pract.*, vol. 1, no. 2, 1994.
- [79] Y. Pang, S. Chao, G. Lin, and H. W. Member, "Network Access for M2M / H2H Hybrid Systems : A Game Theoretic Approach," *Commun. Lett. IEEE*, vol. 18, no. 5, pp. 845–848, 2014.
- [80] K. D. Lee, S. Kim, and B. Yi, "Throughput comparison of random access methods for M2M service over LTE networks," *2011 IEEE GLOBECOM Work. GC Wkshps 2011*, pp. 373–377, 2011.
- [81] T. Henttonen, K. Aschan, J. Puttonen, N. Kolehmainen, P. Kela, M. Moisio, and J. Ojala, "Performance of VoIP with mobility in UTRA long term evolution," *IEEE Veh. Technol. Conf.*, no. Sept. 2015, pp. 2492–2496, 2008.
- [82] M. R. Tabany and C. G. Guy, "An End-to-End QoS Performance Evaluation of VoLTE in 4G E-UTRAN-based Wireless Networks," no. DL, pp. 90–97, 2014.
- [83] D. R. Kuhn, T. J. Walsh, and S. Fries, "Security Considerations for Voice Over IP Systems Recommendations of the National Institute of Standards and Technology," *NIST special publication*, pp. 800-58. 2005.
- [84] C. Chuah, "Providing End-to-End QoS for IP-based Latency-sensitive Applications," *Tech. Report, Dept. Electr. Eng. Comput. Sci. Univ. Calif. Berkeley*, pp. 1–25, 2000.
- [85] T. Janevski, *Traffic Analysis and Design of Wireless IP Networks*. Norwood, MA: ARTECH HOUSE, INC., 2003.
- [86] ITU-T, "Internet protocol data communication service – IP packet transfer and availability performance parameters," *ITU-T, Geneva, SH, Rec. ITU-T Y.1540*, Mar. 2011.
- [87] H. Allen and C. Vicente, "Network Performance Definitions and Analysis," vol. 31, no. March. *PacNOG*, pp. 1–61, 2005.
- [88] Percentiles: Definition and Examples. (n.d.). Statistics How To. [Online]. Available: <http://www.statisticshowto.com/percentiles/>. [Accessed: 30-Sept-2015].
- [89] J. M. Morán, "Complementary Lecture Notes on Computer Networks (WIP) Chapter 1," vol. 1, no. C. *ES*, pp. 1–14, 2015.

- [90] R. Jain, *The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modelling*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1991, ch. 25, sec. 1, pp 444.
- [91] P. Osti, P. Lassila, S. Aalto, A. Larmo, and T. Tirronen, "Analysis of PDCCH performance for M2M traffic in LTE," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 63, no. 9, pp. 4357–4371, Nov. 2014.
- [92] A Baid, R. Madan, and a Sampath, "Delay estimation and fast iterative scheduling policies for LTE uplink," *Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt)*, 2012 10th International Symposium on, IEEE, pp. 89– 96, 2012.
- [93] P. Seeling, F. H. P. Fitzek, and M. Reisslein, *Video Traces for Network Performance Evaluation: A Comprehensive Overview and Guide on Video Traces and Their Utilization in Networking Research*. New York, NY: Springer Science & Business Media, 2007, pp. 2.