



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN:  
MODELADO Y EVALUACIÓN DE UNA RED DE VOZ SOBRE LTE

Previa la obtención del Grado Académico de Magíster en  
Telecomunicaciones

ELABORADO POR:  
Ing. Luis Daniel Muñoz Mendoza

Guayaquil, a los 15 días del mes de Diciembre año 2014



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

## SISTEMA DE POSGRADO

### CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magíster Luis Daniel Muñoz Mendoza como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de Magíster en Telecomunicaciones.

Guayaquil, a los 15 días del mes de Diciembre año 2014

### DIRECTOR DE TESIS

---

MsC. Edwin Palacios Meléndez

### REVISORES:

---

MsC. Néstor Zamora Cedeño.

---

MsC. Luis Córdova Rivadeneira

### DIRECTOR DEL PROGRAMA

---

MsC. Manuel Romero Paz



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

## SISTEMA DE POSGRADO

### DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

YO, LUIS DANIEL MUÑOZ MENDOZA

#### DECLARÓ QUE:

El Trabajo de Titulación “MODELADO Y EVALUACIÓN DE UNA RED DE VOZ SOBRE LTE”, previa a la obtención del grado Académico de Magíster, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación del Grado Académico en mención.

Guayaquil, a los 15 días del mes de Diciembre año 2014

EL AUTOR

---

Ing. Luis Daniel Muñoz Mendoza



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

## SISTEMA DE POSGRADO

### AUTORIZACIÓN

YO, LUIS DANIEL MUÑOZ MENDOZA

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación de Maestría titulado: “MODELADO Y EVALUACIÓN DE UNA RED DE VOZ SOBRE LTE”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 15 días del mes de Diciembre año 2014

EL AUTOR

---

Ing. Luis Daniel Muñoz Mendoza

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo primeramente a Dios, por darme la sabiduría y el entendimiento para poder obtener un logro más en mi vida.

A mi madre Alba, a mi hermana Pilar y toda mi familia quienes han sido ejemplos de vida dignos de superación y entrega.

A mi amada esposa la Ing. Marianela Merchán por su paciencia, amor y por su apoyo incondicional en todas las decisiones que he tomado, a mi hijo Daniel Sebastián que es mi mayor orgullo y satisfacción que he tenido en mi vida.

## **Agradecimientos**

Agradezco a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil por la oportunidad brindada, para realizar la Maestría en Telecomunicaciones, al MsC. Edwin Palacios Meléndez, Director de Tesis, gracias por su asesoramiento y dedicación, de manera especial al MsC Manuel Romero Paz por toda su ayuda y colaboración brindada para la culminación del proyecto y a todos los docentes por transmitir sus conocimientos durante todo este proceso.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS .....	XI
Resumen.....	XII
Abstract.....	XIII
Capítulo 1: Generalidades del Trabajo de Intervención.....	14
1.1. Justificación.....	14
1.2. Antecedentes.....	14
1.3. Definición del problema .....	15
1.4. Objetivos.....	15
1.5. Hipótesis.....	16
1.6. Metodología de investigación.....	16
Capítulo 2: Fundamentación Teórica.....	17
2.1. Arquitectura de Tecnología LTE.....	17
2.1.1. Control de acceso al medio en la capa física.....	18
2.1.2. Tramas y líneas de tiempo de paquetes: Enlace descendente LTE.    20	
2.2. La vida de un paquete de LTE.....	21
2.2.1. La vida de un paquete de LTE: enlace descendente.....	21
2.2.1.1. Capa de control de acceso al medio (MAC).....	22
2.2.1.2. ARQ híbrido.....	23
2.2.1.3. Canales MAC .....	24
2.2.1.4. Mapeo MAC de enlace descendente.....	24
2.2.2. La vida de un Paquete de LTE: Enlace Ascendente .....	26
2.2.2.1. Capa PDCP.....	26
2.2.2.2. Capa RLC.....	27
2.2.2.3. Capa MAC.....	28
2.2.2.4. Proceso del canal de acceso aleatorio.....	30
2.2.2.5. Acceso aleatorio basado en contención.....	30

2.2.2.6. Acceso aleatorio no basado en contención. ....	32
2.3. LTE: Protocolos de funcionamiento. ....	33
2.3.1. Programación o planificación.....	33
2.3.1.1. Programación de enlaces descendentes.....	34
2.3.1.2. Programación de enlace descendente con HARQ. ....	35
2.3.1.3. Programación de enlace ascendente con HARQ .....	36
Capítulo 3: Diseño y Resultados del modelo LTE .....	38
3.1. Introducción a la plataforma OPNET. ....	38
3.2. Descripción de la plataforma OPNET. ....	38
3.2.1. Descripción general de Modelo LTE en OPNET .....	38
3.2.2. Inconvenientes al modelar una red LTE. ....	41
3.3. Simulación de la red de voz sobre LTE. ....	42
3.3.1. Nodos Móviles LTE. ....	43
3.3.2. eNodo B.....	44
3.3.3. Modelo IMS. ....	45
3.4. Configuración de la aplicación.....	47
3.5. Resultados obtenidos en el modelado de LTE sobre IP. ....	48
3.5.1. Escenario 1.....	48
3.5.1.1. Descripción del escenario 1.....	48
3.5.1.2. Análisis de los resultados .....	50
Capítulo 4: Conclusiones y Recomendaciones.....	53
4.1. Conclusiones.....	53
4.2. Recomendaciones.....	53
Referencias Bibliográficas.....	55



## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 2:

Figura 2. 1: Arquitectura de la Tecnología LTE.....	17
Figura 2. 2: Esquema del enlace descendente en el dominio del tiempo. ...	21
Figura 2. 3: Modulación BPSK con portadoras de fases diferentes. ....	22
Figura 2. 4: Operación simplificada de ARQ híbrido. ....	24
Figura 2. 5: Mapeo MAC de enlace descendente.....	25
Figura 2. 6: Proceso de la vida de paquetes de LTE para enlaces ascendentes.....	27
Figura 2. 7: Concatenación RLC en enlaces ascendentes. ....	28
Figura 2. 8: Canal de mapeo MAC de enlace ascendente.....	29
Figura 2. 9: Procedimiento basado en contención. ....	31
Figura 2. 10: Procedimiento no basado en contención. ....	32
Figura 2. 11: Programación dinámica. ....	34
Figura 2. 12: Programación o planificación semi-persistente y dinámica.....	35
Figura 2. 13: Programación de enlace descendente con HARQ.....	35
Figura 2. 14: Proceso de la programación de enlace descendente ACK/NACK.....	36
Figura 2. 15: Programación de enlace ascendente con HARQ.....	37
Figura 2. 16: Proceso de la programación de enlace descendente ACK/NACK.....	37

### Capítulo 3:

Figura 3. 1: Modelo de la red LTE.....	39
Figura 3. 2: Transmisión de datos en una red LTE. ....	40
Figura 3. 3: Arquitectura a nivel de protocolos en una red LTE. ....	41
Figura 3. 4: Encapsulado de paquetes GTP. ....	41
Figura 3. 5: Simulación en OPNET de la red de voz sobre LTE. ....	43
Figura 3. 6: Configuración de los nodos móviles. ....	44
Figura 3. 7: Configuración de atributos de la función IMS Proxy. ....	46

Figura 3. 8: Retardo extremo a extremo de paquetes de voz vs número de usuario de VoIP. ....	50
Figura 3. 9: Variación de retardo de paquetes vs número de usuarios de VoIP. ....	51

## ÍNDICE DE TABLAS

### Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Tipos de portadoras para DSCP. ....	43
Tabla 3. 2: Configuración de parámetros del eNodo B.....	45
Tabla 3. 3: Parámetros de configuración de VoIP.....	48
Tabla 3. 4: Definiciones de calidad de servicio (QoS) del portador EPS. ....	49

## **Resumen**

El presente proyecto tiene como objetivo simular una red de voz sobre LTE, aunque en la realidad este tipo de servicio no es brindado por ninguna de las Operadoras Móviles de Ecuador. Nos basamos en trabajos e investigaciones efectuadas en Estados Unidos, donde se han realizado pruebas durante el 2013 y también han sido comercializados sus servicios. La simulación de esta red de voz sobre LTE ha sido desarrollada bajo la plataforma OPNET Modeler.

## **Abstract**

The objective regarding this Project is to simulate a voice network on LTE although in reality this type of service is not offered by any of the mobile companies in Ecuador. Our focus has been on researches and works taken place in the U.S.A., where tests have taken place during 2013, and also then services have been merchandized. The network simulation of the voice on LTE has been developed under the OPNET Modeler platforms.

## **Capítulo 1: Generalidades del Trabajo de Intervención.**

### **1.1. Justificación.**

Aún con la introducción de HSPA, la evolución de UMTS no ha llegado a su fin, para garantizar la competitividad de UMTS para los próximos 10 años y más allá, en la cual UMTS LTE (Long Term Evolution, Evolución a Largo Plazo) se ha introducido en el 3GPP Release 8. La tecnología LTE también se la conoce como UTRA evolucionada y UTRAN evolucionada, las mismas que proporcionan nuevos conceptos de la capa física y arquitectura de protocolos para UMTS.

En contraste con el modelo de conmutación de circuitos de los sistemas celulares anteriores, LTE ha sido diseñado para soportar sólo los servicios de conmutación de paquetes. Su objetivo es ofrecer el Protocolo de Internet (IP) la conectividad sin fisuras entre el equipo de usuario (UE) y la red de datos por paquetes (PDN), sin interrumpir las aplicaciones de los usuarios finales durante la movilidad.

Mientras que el término "LTE" abarca las evolución del Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS) de acceso de radio a través de la evolucionada UTRAN (E-UTRAN), se acompaña de una evolución de los aspectos no de radio bajo el término "Sistema de Evolución de la Arquitectura" (SAE), que incluye la red de núcleo de paquetes evolucionado (EPC).

### **1.2. Antecedentes.**

Las redes de voz sobre LTE está siendo considerado para el despliegue de las operadoras de telefonía móvil a nivel mundial, ya que ofrece soporte simultáneo de voz y datos en la red LTE. El modelado de la red de voz sobre LTE, la voz se lleva a cabo en la red LTE así como la voz

sobre paquetes IP (VoIP). Por lo tanto, la arquitectura de voz sobre LTE es significativamente diferente de las redes 2G y 3G que tienen diferentes capacidades para circuitos conmutados (CS, Circuit Switched) de voz.

En las redes tradicionales como GSM/UMTS, redes basadas en IP se utilizan principalmente para la realización de servicios de datos como FTP, HTTP, etc. Sin embargo, con el crecimiento de las tecnologías de banda ancha móviles como High Speed Packet Access (HSPA) y LTE, existe una creciente necesidad de transmitiendo voz y datos en la misma red basada en IP. Tal arquitectura podría conducir a una reducción significativa en los costes de operación y mantenimiento de las redes. También permite a las operadoras la inserción de nuevos servicios basados en IP como Rich Communication Suite (RCS), que puede proporcionar a los usuarios una mejor calidad a costos reducidos.

### **1.3. Definición del problema**

Necesidad de modelar sistemas de comunicaciones móviles como LTE que permita estudiar las diversas estrategias de planificación de la red de transporte y analizar su impacto en el tráfico de VoIP durante los períodos de congestión mediante simulaciones utilizando la plataforma OPNET.

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo General:**

Desarrollar la simulación de una red de voz sobre LTE mediante la plataforma OPNET Modeler.

#### **1.4.2. Objetivos específicos:**

- ✓ .Establecer la fundamentación teórica de los sistemas de comunicaciones móviles UMTS LTE.

- ✓ Diseñar el modelo de red de voz sobre LTE mediante la plataforma OPNET.
- ✓ Analizar los resultados obtenidos en la plataforma de simulación OPNET Modeler.

### **1.5. Hipótesis**

Mediante la simulación de una red de voz sobre LTE en OPNET Modeler se comprobará a nivel de transporte que los niveles de calidad de servicio corresponde a normativas establecidas en comunicaciones móviles LTE.

### **1.6. Metodología de investigación.**

El tipo de investigación para el desarrollo del presente trabajo de grado es el “Experimental”. La investigación experimental nos permite obtener excelentes resultados en aplicaciones relacionados a las Telecomunicaciones dentro del campo de las Ciencias Técnicas, mientras que en el campo de las Ciencias Sociales las investigaciones experimentales son muy complejas, sobre todo en el vivir diario.

Un experimento diseñado es una prueba o serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en una o más de las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas en la respuesta de salida. Se manipulan deliberadamente una o más variables independientes (supuestas causas) para analizar las consecuencias de esa manipulación sobre una o más variables dependientes (supuestos efectos), dentro la situación de control de la investigación. Manipular las variables es sinónimo de hacer variar o dar distintos valores a la variable independiente.



## Capítulo 2: Fundamentación Teórica.

### 2.1. Arquitectura de Tecnología LTE.

En la figura 2.1 se proporciona la arquitectura de alto nivel de la tecnología LTE (Long Term Evolution), esta es una captura de la parte que interacciona más directamente con el equipo de usuario (UE) también llamada dispositivo móvil. En realidad la arquitectura es mucho más compleja, ya que un diagrama completo mostraría toda la Internet y otros aspectos de la conectividad de la red de apoyo a los trasposos entre 3G, 2G, WiMax, y otras normas existentes en telefonía celular.

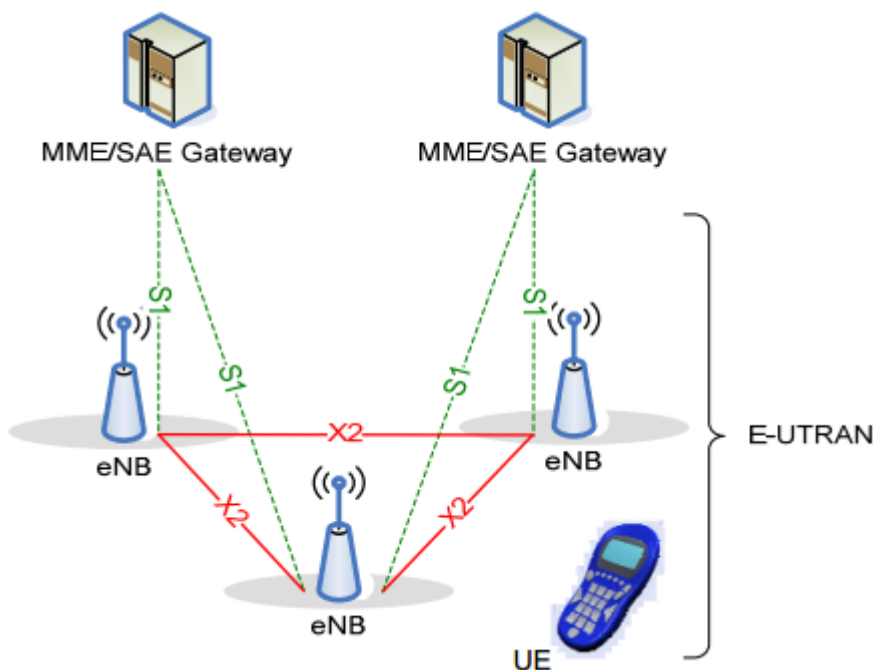


Figura 2. 1: Arquitectura de la Tecnología LTE

Fuente:

Donde, eNB es el eNodo B (Enhanced Node B), EPC es el núcleo de paquetes evolucionado (Evolved Packet Core), MME es la movilidad de entidad de gestión (Mobility Management Entity), SAE es la arquitectura del sistema evolucionado (System Architecture Evolved) y E-UTRAN es la red de acceso terrestre universal evolucionado.

Adicionalmente, en la figura 2.1 se puede ver que los dispositivos en particular muestran al eNodo B (que es otro nombre para la estación base) y las interfaces entre el eNodo B y UEs. En consecuencia, la E-UTRAN es la totalidad de la red, que es tomado del nombre de las normas "oficiales" para LTE.

### **2.1.1. Control de acceso al medio en la capa física.**

La capa física (PHY) de la tecnología LTE es típicamente full dúplex. La tecnología LTE está diseñada principalmente para la operación full dúplex en espectro emparejado. Para contrastar, las redes WiMax operan como half dúplex en el espectro no apareado, donde la información se transmite en una sola dirección a la vez.

La tecnología LTE puede soportar la operación de división de tiempo dúplex (TDD) en el espectro no apareado; sin embargo, no es un enfoque principal del diseño. La capa física funciona de forma continua para el enlace descendente con sincronizaciones intercaladas, proporcionando múltiples canales simultáneamente con diferentes modulaciones.

El canal de enlace descendente funciona como un flujo continuo, a diferencia de los estándares de la familia IEEE® 802, no existe una relación entre los cuadros de la interfaz aérea transmitidas en el aire y la unidad de datos de servicio real (SDU, Service Data Unit) de los paquetes que vienen de la parte superior de la pila de protocolos. Adicionalmente, LTE utiliza el concepto de un bloque de recursos, que es un bloque de 12 subportadoras en una ranura, donde el bloque de transporte es un grupo de bloques de recursos común ya sea para la modulación y codificación.

La interfaz física es un bloque de transporte, que corresponde a los datos transportados en un período de tiempo de la asignación para la UE

particular. Cada subtrama de radio es de 1 ms (milisegundos) de largo; y cada trama es de 10 ms. Para múltiples UEs pueden ser atendidos en el enlace descendente en un momento determinado del bloque de transporte. Por lo tanto, la MAC se encarga de controlar los envíos en un momento determinado.

El estándar de la tecnología LTE especifica estos canales físicos de la siguiente manera:

- ✓ **Canal físico de difusión (PBCH)**
  - El bloque de transporte codificado BCH se le asigna a cuatro subtramas dentro de un intervalo de tiempo de 40 ms
  - En un tiempo de 40 ms se detecta a ciegas, es decir, no hay una señalización explícita que indica 40 ms de tiempo
  - Cada subtrama se supone que es auto codificable, es decir, el BCH puede ser decodificada a partir de una sola recepción, suponiendo que existe suficientemente buenas condiciones de canal.
  
- ✓ **Canal físico del indicador de formato de control (PCFICH)**
  - La UE informa sobre el número de símbolos OFDM usado para los PDCCHs.
  - Transmisión en cada subtrama
  
- ✓ **Canal físico de control de enlace descendente físico (PDCCH)**
  - Notifica al UE acerca de la asignación de recursos de PCH y DL-SCH, y el ARQ híbrido la información relacionada con DL-SCH.
  - Lleva la concesión de planificación de enlace ascendente

- ✓ **Canal físico indicador de ARQ híbrida (PHICH):** Lleva híbridos ARQ ACK / NAK en respuesta a las transmisiones de enlace ascendente.
- ✓ **Canal físico compartido del enlace descendente (PDSCH):** Lleva el DL-SCH y PCH
- ✓ **Canal físico multidifusión (PMCH):** Lleva el SMI
- ✓ **Canal físico de control del enlace ascendente (PUCCH)**
  - Lleva Hybrid ARQ ACK / NAK en respuesta a la transmisión de enlace descendente
  - Lleva Programación de Solicitud (SR)
  - Realiza informes CQI
- ✓ **Canal físico compartido del enlace ascendente (PUSCH):** Lleva el UL-SCH
- ✓ **Canal físico de acceso aleatorio (PRACH):** Lleva el preámbulo de acceso aleatorio

### 2.1.2. Tramas y líneas de tiempo de paquetes: Enlace descendente LTE.

En la figura 2.2 se muestra el esquema para enlaces descendentes en el dominio del tiempo, en la parte inferior se representa las tramas de radiocomunicaciones. Una trama completa ocurre en 10 ms, pero normalmente pensamos en términos de las subtramas en intervalos de tiempo de 1 ms, que es la entidad que contiene el bloque de transporte. Dentro del bloque de transporte está el encabezado MAC y cualquier espacio extra (relleno).

Dentro de que no es la cabecera RLC, a continuación, dentro de la cabecera RLC no puede haber un número de PDCPs. Hay una relación algo arbitraria entre los paquetes IP que llegan, que forman la SDU, y cómo se

forman las PDU de RLC. Por lo tanto usted puede hacer el uso más eficaz de los recursos de radio en un período fijo de tiempo.

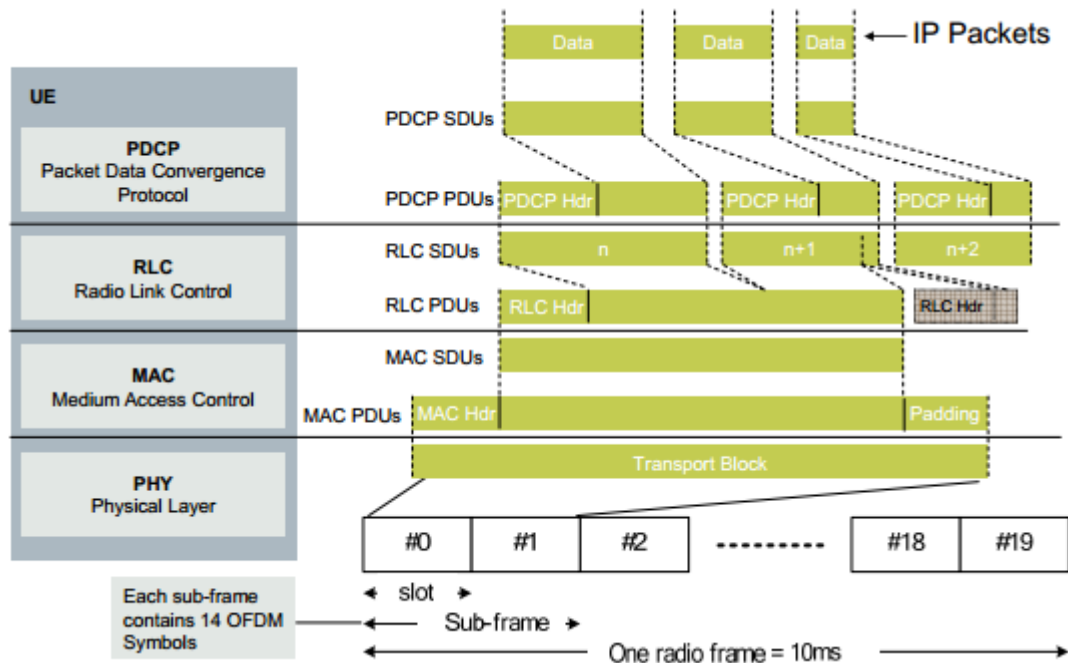


Figura 2. 2: Esquema del enlace descendente en el dominio del tiempo.

Fuente:

## 2.2. La vida de un paquete de LTE

En esta sección se traza el flujo de un paquete a través de las subcapas de la pila LTE. La dirección de enlace descendente (desde la red al terminal) está cubierta primero. Un paquete de enlace ascendente se describe a continuación, destacando las diferencias.

### 2.2.1. La vida de un paquete de LTE: enlace descendente

Las pilas siempre se muestran gráficamente con las capas más altas en la parte superior, por lo que el flujo descendente que progresa hacia arriba a través de la pila mostrada en la figura 2.3. Esta inicia mediante la entrega de un bloque de transporte desde la capa física a la MAC, que contiene la información que ha sido decodificada fuera del aire en la subtrama de radio anterior. No puede haber una relación arbitraria entre lo

que está en el bloque de transporte y los paquetes reales que están siendo entregados a las capas superiores.

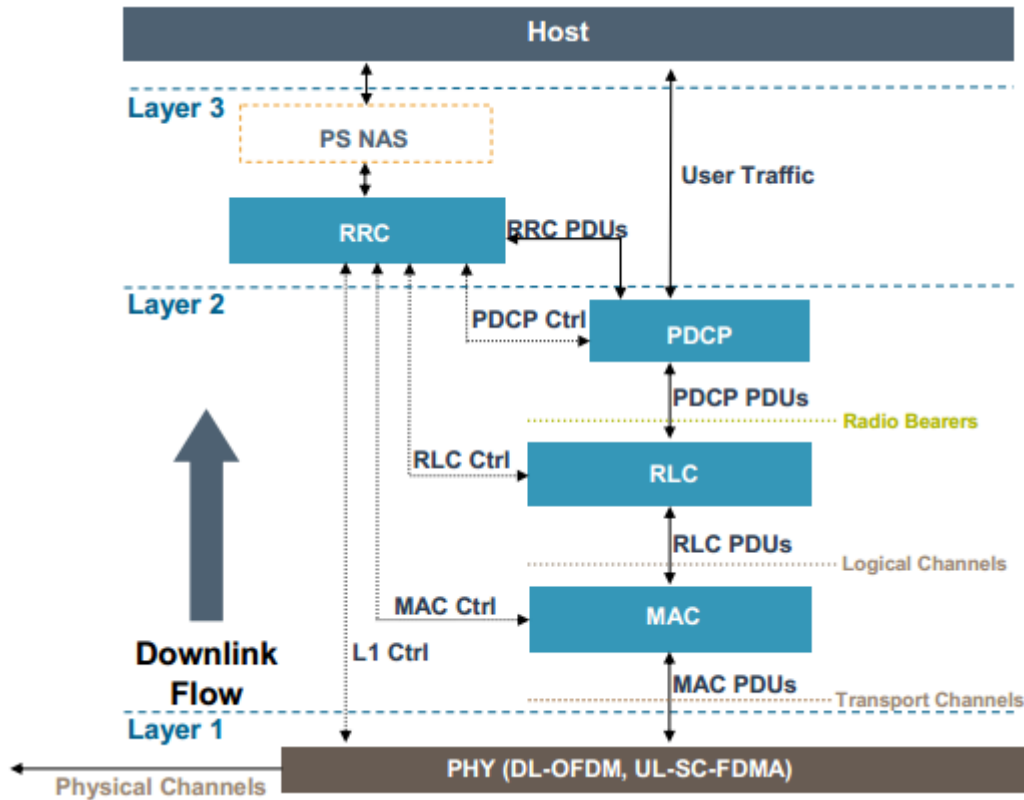


Figura 2. 3: Modulación BPSK con portadoras de fases diferentes.

Fuente:

El bloque de transporte, entregado desde la capa física (PHY) a la capa de control de acceso al medio (MAC), contiene datos de la subtrama de radio anterior. Puede contener paquetes múltiples o parciales, dependiendo de la programación y de modulación. A continuación se describen cada una de las capas de la figura 2.3:

### 2.2.1.1. Capa de control de acceso al medio (MAC).

La MAC es representada por el bloque mostrado en la figura 2.3, que es la que se encarga de gestionar la función de ARQ híbrido, que a la vez es un reintento automático de nivel de bloque de transporte. También realiza el transporte como una asignación lógica de una función que se descompone en diferentes canales lógicos de los bloques de transporte para las capas

superiores. El formato de selección y de mediciones proporciona información acerca de la red que se necesita para la gestión de toda la red y control de recursos de radio.

#### **2.2.1.2. ARQ híbrido**

El proceso híbrido de repetición-petición automática (HARQ), hecho en combinación entre las capas MAC y PHY, retransmiten bloques de transporte (TBS) para la recuperación de errores. La capa PHY lleva a cabo la retención y re-combinación (redundancia incremental) y la MAC se encarga de realizar la gestión y señalización.

La capa MAC indica un NACK cuando hay un fallo de bloque de transporte CRC; la capa PHY por lo general indica que él fracaso. La retransmisión se realiza por el eNodo B o el remitente en el enlace descendente utilizando un tipo diferente de codificación. La codificación se envía y se mantiene en tampones en el eNodo B. Finalmente, después de uno o dos intentos, no habrá suficientes datos para reconstruir la señal.

En la operación HARQ, la retransmisión no tiene que ser completamente correcta, puede que ser lo suficientemente correcta que se puede combinar matemáticamente con el bloque de transporte anterior con el fin de producir un buen bloque de transporte. Esta es la forma más eficiente de proporcionar la función ARQ, utilizada en el nivel de bloque de transporte, por lo que hay otro mecanismo de proceso de ARQ que opera en el RLC. A continuación se describen los pasos básicos del proceso HARQ:

- La capa MAC envía mensaje "NACK" cuando TB falla CRC
- Se conservan bloques de transporte con errores
- La capa PHY retransmite con diferentes códigos de punción.
- Retransmisión combinada con el bloque de transporte ahorrado (s).
- Cuando se decodifica el bloque de transporte correcto, señales MAC "ACK"

- Múltiples procesos HARQ pueden funcionar en paralelo para reintentar varias TB pendientes.



Figura 2. 4: Operación simplificada de ARQ híbrido.

Fuente:

### 2.2.1.3. Canales MAC

Existen canales lógicos en la parte superior de la MAC, en la cual ellos representan los servicios de transferencia de datos ofrecidos por el MAC y se definen por el tipo de información que llevan. Los tipos de canales lógicos incluyen canales de control (para datos del plano de control) y canales de tráfico (para datos del plano de usuario). Los canales de transporte se encuentran en los bloques de transporte en la parte inferior de la MAC. Ellos representan servicios de transferencia de datos que ofrece la capa física (PHY) y se definen por cómo se lleva la información a diferentes modulaciones de la capa física y la forma en que se codifican.

### 2.2.1.4. Mapeo MAC de enlace descendente

Cuando un bloque de transporte válido está disponible en el proceso de HARQ, los canales de transporte se asignan a canales lógicos. En la figura 2.5 se muestra el canal de control de la capa física en la parte inferior; la elaboración final se termina en la capa MAC. Es utilizado para programar la señalización y otras funciones de bajo nivel. El canal compartido de enlace



descendente contiene tanto un canal de transporte para paginación y para enlaces descendentes. El canal de difusión física va todo el camino a través de la difusión.

Los canales de multidifusión aparecen en gris en la figura 2.5 ya que no están especificados en el Release 8 del estándar LTE, aunque estos canales son abordados en la versión 9.

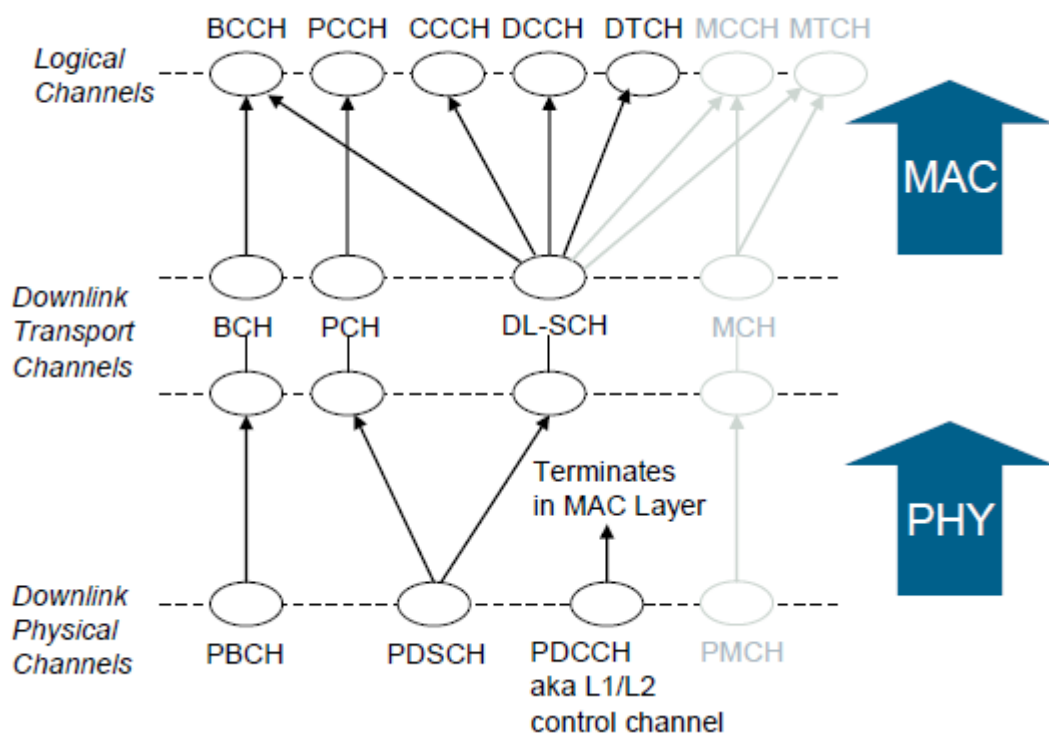


Figura 2. 5: Mapeo MAC de enlace descendente.

Fuente:

Los canales de transporte utilizan diferentes tipos de modulaciones y de codificación. Los canales de búsqueda y difusión deben ser recibidos por todas partes en la célula, por lo que deben utilizar modulación robusta. El DL-SCH puede ser optimizado por la UE. En la figura 2.5 ilustra los siguientes canales lógicos:

- PCCH: Canal de control de búsqueda (Paging Control Channel)
- BCCH: Canal de control de difusión (Broadcast Control Channel)

- CCCH: Canal de control común (Common Control Channel)
- DCCH: Canal de control dedicado (Dedicated Control Channel)
- DTCH: Canal de tráfico dedicado (Dedicated Traffic Channel)
- MCCH: Canal de control de multidifusión (Multicast Control Channel)
- MTCH: Canal de tráfico de multidifusión (Multicast Traffic Channel)

A continuación se definen los canales de transporte:

- PCH: Canal de búsqueda (Paging Channel)
- BCH: Canal de difusión (Broadcast Channel)
- DL-SCH: Canal compartido del enlace descendente (Downlink Shared Channel)
- MCH: Canal multidifusión (Multicast Channel)

## **2.2.2. La vida de un Paquete de LTE: Enlace Ascendente**

Los procesos de LTE en el lado ascendente a menudo son similares a los procesos en el lado descendente. Las principales diferencias son que la tasa de datos máxima es la mitad del de enlace descendente; el acceso se concede por el eNodo B; hay cambios en los canales lógicos y canales de transporte; y el acceso aleatorio es usado para las transmisiones iniciales. La capa física (PHY) utiliza SC-FDMA para el enlace ascendente debido a que tiene una relación de pico (máximo) a promedio más bajo, lo que permite un transmisor de más bajo consumo de energía en el UE.

### **2.2.2.1. Capa PDCP.**

Las funciones PDCP son simétricas para el enlace ascendente y el enlace descendente. El bloque PDCP en la figura 2.6 ilustra el proceso. Las funciones son las mismas para la compresión de cabecera y del cifrado, pero

se presentan en orden inverso. El procesamiento de enlace ascendente también incluye la compresión de cabecera y del cifrado.

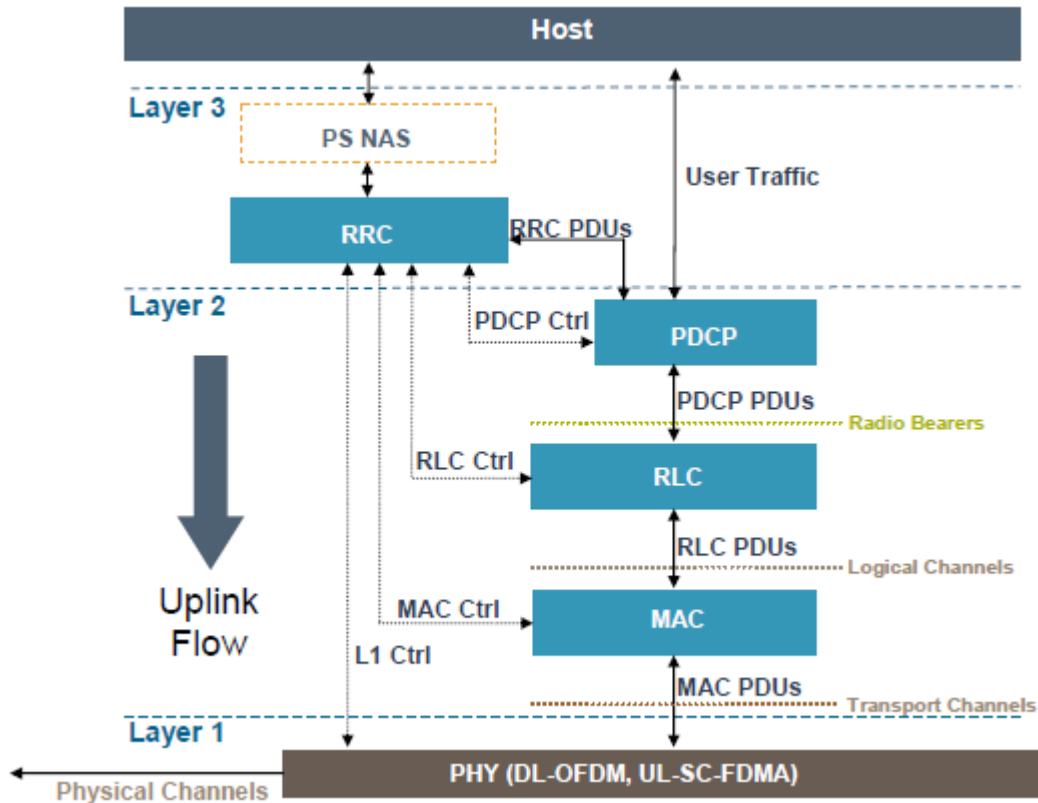


Figura 2. 6: Proceso de la vida de paquetes de LTE para enlaces ascendentes. Fuente:

### 2.2.2.2. Capa RLC

Las funciones RLC, que se muestran en el bloque RLC en la Figura 2.6, también son simétricas para el enlace ascendente y el enlace descendente. En lugar de eliminar las cabeceras, actualmente se aplican cabeceras. Todavía hay una necesidad de soportar el modo transparente, el modo sin acuse de recibo y el modo reconocido.

Los procesos del enlace ascendente se concatenan en lugar de segmentos de SDU en los bloques de transporte. La segmentación se realiza sólo cuando es necesario para adaptarse a las SDU en un bloque de transporte.

La concatenación es el proceso de empaquetar una RLC SDU en un tamaño apropiado para bloques de transporte. Los tamaños de la RLC PDU se eligen en función del tamaño del bloque de transporte para la señal de portadora de radio. Si la RLC SDU es grande, o la velocidad de datos de radio disponible es baja, la RLC SDU se puede dividir en varias RLC PDUs. Si la RLC SDU es pequeña o la velocidad de datos de radio disponible es alta, varias RLC SDUs se puede empaquetar en una sola PDU. En muchos casos se dan tanto la división y el empaquetado, tal como se muestra en la figura 2.7.

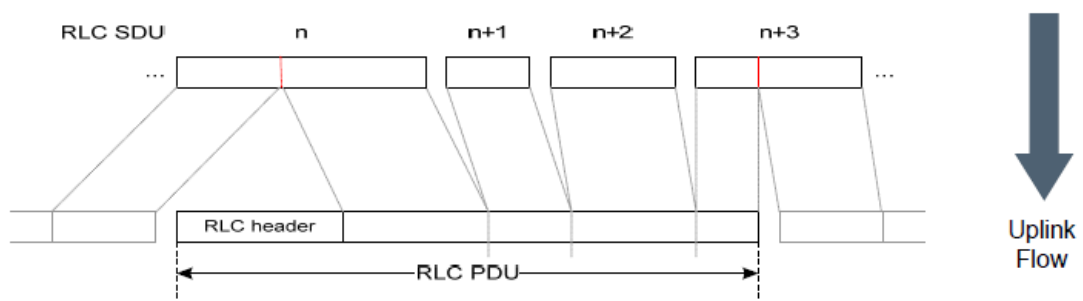


Figura 2. 7: Concatenación RLC en enlaces ascendentes.

Fuente:

### 2.2.2.3. Capa MAC

Las funciones MAC en el enlace ascendente ilustrado por el bloque de MAC de la figura 2.6, son significativamente diferentes para enlaces ascendentes y enlaces descendentes. Las funciones de enlaces ascendentes incluyen un canal de acceso aleatorio, programación, cabeceras de construcción y selección de formatos de transporte.

#### a. Selección de Formato de Transporte.

La MAC determina el formato de transporte de cómo usarlo, cómo empaquetar la información, y qué modulación y codificación están disponibles y configurar adecuadamente la capa PHY para estar listo a transmitir. El canal compartido de enlace ascendente (ULSCH) es el canal de transporte primario.

Las variables con formato son la modulación y la codificación, que determinan la velocidad de datos. La MAC determina la capacidad de un bloque de transporte basado en el formato de transporte.

b. Canal de Mapeo MAC de enlace ascendente.

Los canales de control común (CCCH), canal de control dedicado (DCCH) y canal de tráfico dedicado (DTCH) están asignadas a la UL-SCH, tal como se muestra en la figura 2.8. Todas las transmisiones MAC en la UL-SCH se deben programar mediante el proceso del canal de acceso aleatorio (RACH). Cuando el UE no está conectado, no hay intervalos de transmisión ya que están cada vez programados.

Los RACHs proporcionan un medio para dispositivos desconectados a transmitir. La transmisión del UL-SCH requiere una asignación de recursos desde el eNodo B, y la alineación de tiempo para estar al corriente, caso contrario se necesita el proceso RACH.

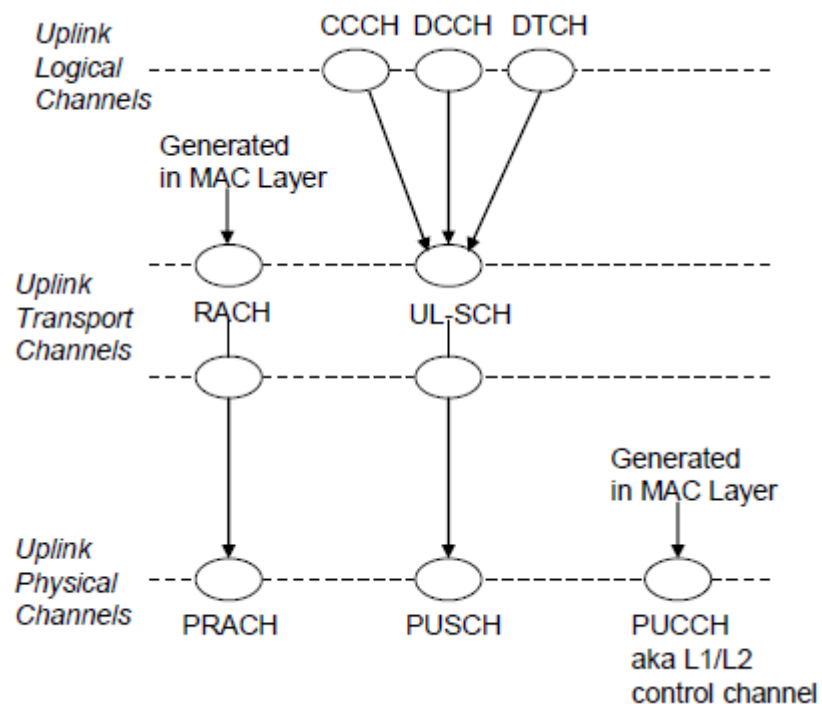


Figura 2. 8: Canal de mapeo MAC de enlace ascendente.

Fuente:

#### **2.2.2.4. Proceso del canal de acceso aleatorio.**

El proceso RACH es utilizado en cuatro casos, que son:

- ✓ Acceso inicial desde el estado desconectado (RRC\_IDLE) o falla de radio.
- ✓ Procedimiento de acceso aleatorio que requiere entrega.
- ✓ El DL (enlace descendente) o UL (enlace ascendente) durante la llegada de datos RRC\_CONNECTED después que UL PHY ha perdido la sincronización (posiblemente debido a que podía salvar la operación).
- ✓ Llegada de datos de enlace ascendente (UL) cuando no hay petición de planificación dedicada (PUCCH) a canales disponibles.

El tiempo es crítico porque el UE puede moverse a diferentes distancias desde la estación base, y LTE requiere de microsegundos de nivel de precisión; la velocidad de retardo de propagación de la luz por sí sola puede ocasionar suficientes cambios para causar una colisión o un problema de tiempo si no se mantiene.

Hay dos formas de procedimiento de RACH: el primero basado en contención, que pueden aplicarse a los cuatro eventos anteriores, y el segundo no basado en contención, que se aplica sólo a la entrega y la llegada de datos de enlaces descendentes (DL). La diferencia es si hay o no una posibilidad de fallo usando preámbulo de solapamiento RACH.

#### **2.2.2.5. Acceso aleatorio basado en contención.**

La figura 2.9 muestra las cuatro etapas del procedimiento basado en contención de RACH.

- 1. Preámbulo de acceso aleatorio:** enviada en un conjunto especial de los recursos de la capa física, que son de un grupo de subportadoras asignadas para este fin.

- a) Utiliza secuencias Zadoff-Chu, una codificación similar a CDMA como para permitir transmisiones simultáneas que han de ser decodificadas.
- b) Identificación (ID) aleatorio de 6 bits.

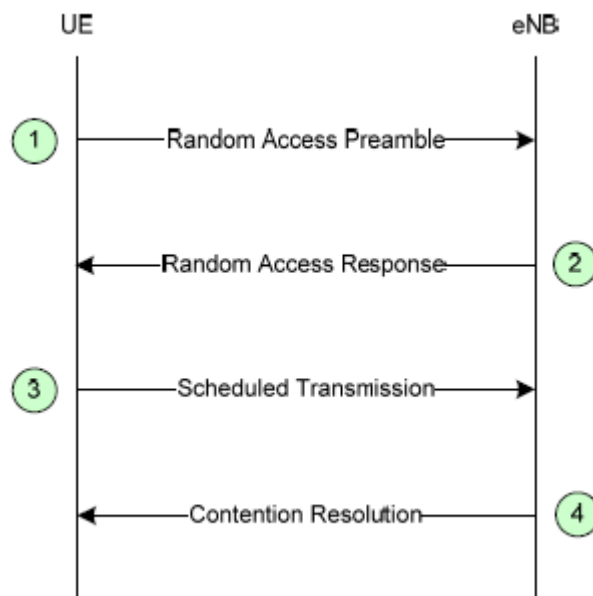


Figura 2. 9: Procedimiento basado en contención.

Fuente:

## 2. La respuesta de acceso aleatorio:

- a) Se envía en el canal de control de enlace descendente físico (PDCCH).
- b) Se envía dentro de una ventana de tiempo de unos cuantos TTI.
- c) Para el acceso inicial, transporta al menos el identificador de preámbulo RA, información de alineación horaria, subvención inicial de enlaces ascendentes (UL), y asignación temporal C-RNTI.
- d) Una o más UE podrán dirigirse en una sola respuesta.

## 3. Transmisiones planificadas o programadas:

- a) Utiliza el modo transparente HARQ y RLC sobre UL-SCH.
- b) Transporta el identificador del UE.

4. **La resolución de contención:** el eNodo B utiliza esta paso opcional para finalizar el proceso de RACH.

#### 2.2.2.6. Acceso aleatorio no basado en contención.

En el procedimiento de acceso aleatorio no basado en contención, no hay ninguna posibilidad de una colisión preámbulo porque el código es pre-asignado por el eNodo B. En la figura 2.10 se muestra los tres pasos de este proceso.

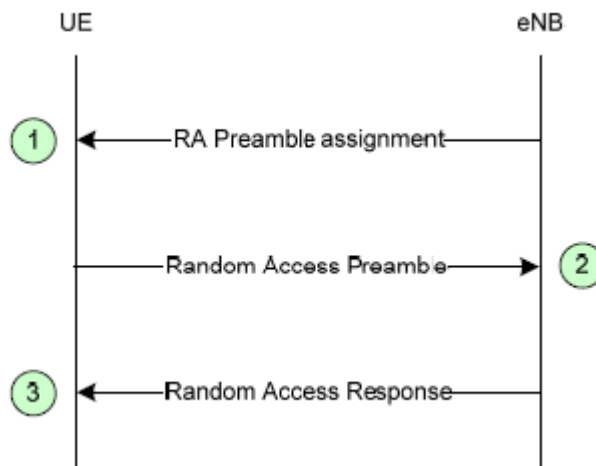


Figura 2. 10: Procedimiento no basado en contención.

Fuente:

- 1) Preámbulo de asignación de acceso aleatorio: el eNodo B asigna el código de preámbulo de 6 bits.
- 2) Preámbulo de acceso aleatorio: la UE transmite el preámbulo asignado.
- 3) Respuesta de acceso aleatorio.
  - a. El mismo que para el basado en contención RA.
  - b. Se envía sobre PDCCH (Canal de control de enlace descendente físico).
  - c. Se envía dentro de una ventana de tiempo de unos cuantos TTI
  - d. Transporta al menos la información de alineación de tiempo y subvención inicial UL para la entrega, y la información de la



alineación de tiempo para la llegada de datos DL. Además, el identificador del preámbulo RA se dirige a RA-RNTI en el canal de control L1/L2.

- e. Una o más UE podrán dirigirse en una sola respuesta.

### **2.3. LTE: Protocolos de funcionamiento.**

Esta sección se aparta el flujo de paquetes y se examina el protocolo LTE sobre un nivel de sistema.

#### **2.3.1. Programación o planificación.**

El eNodo B asigna recursos de la capa física para los canales compartidos de enlaces ascendentes y descendentes (UL-SCH y DL-SCH). Los recursos son compuestos de bloques físicos de recursos (PRB) y del esquema de modulación y codificación (MCS). El MCS (Modulation and Coding Scheme) determina la tasa de bits, y por lo tanto la capacidad, de las PRB. Las asignaciones pueden ser válidas para uno o más ITT; cada intervalo TTI es una subtrama (1 ms).

La programación semi-persistente reduce la señalización del canal de control, si cada asignación fue señalado de forma individual, la sobrecarga sería inaceptable. En una aplicación como voz sobre IP, por ejemplo, una trama de enlace descendente se produce cada 10 a 20 ms. Si cada trama de enlace descendente se señaló de forma individual, está podría causar una gran cantidad de tráfico en el canal de control y el canal de control necesitaría mucho más ancho de banda del necesario.

La programación o planificación semi-persistente, permite configurar una asignación permanente que continúa hasta que sea modificado. Los horarios semi-persistentes pueden configurarse tanto para enlaces ascendentes como enlaces descendentes.

### 2.3.1.1. Programación de enlaces descendentes.

El PDCCH lleva a la célula de radio Identificador Temporal de Red (C-RNTI), que es el identificador dinámico del UE. El CRNTI indica que un próximo recurso de enlace descendente se ha demultiplexado por la MAC y se transmite a las capas superiores y que está previsto para este UE. La periodicidad de la programación semi-persistente se configura por la CRR.

Si la programación es dinámica o semi-persistente se indica mediante el uso de diferentes códigos de aleatorización para el C-RNTI sobre PDCCH. El PDCCH es un canal de muy poco ancho de banda; que no lleva una gran cantidad de información en comparación con el canal compartido de enlace descendente.

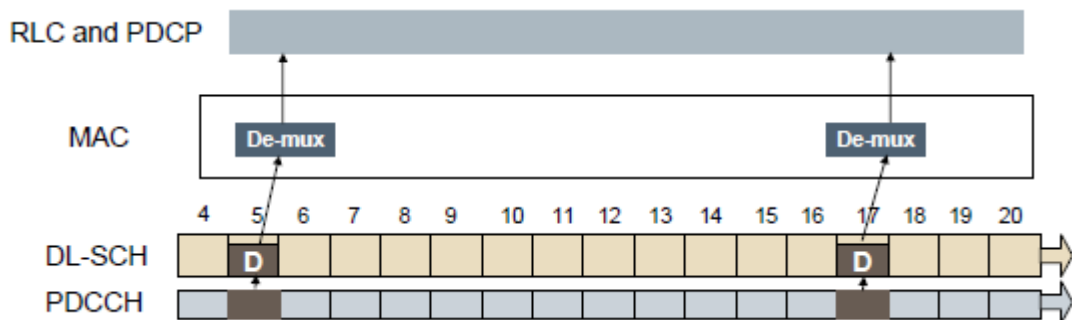


Figura 2. 11: Programación dinámica.

Fuente:

En la figura 2.12 se añade información de la programación (planificación) semi-persistente a la información proporcionada en la figura 2.11. Aquí, el RRC configura algunas programaciones semi-persistentes. Esta ilustración muestra un ejemplo de cuatro TTI. La primera vez que realmente ocurre allí, es la señalización del PDCCH. Después de eso, cada cuatro TTI hay una transmisión que se produce sin ningún tipo de señalización en el canal de control. Puede seguir utilizando programación dinámica al mismo tiempo, para otros fines, si es necesario; esto continúa hasta que se cambie por otra mención sobre el canal de control.

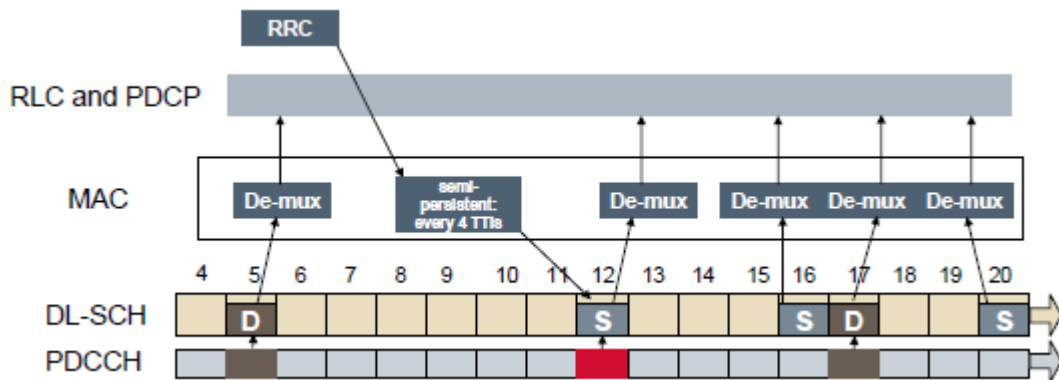


Figura 2. 12: Programación o planificación semi-persistente y dinámica.  
Fuente:

### 2.3.1.2. Programación de enlace descendente con HARQ.

La figura 2.13 sigue basándose en la figura 2.12, en este caso, nuevamente, el C-RNTI se encuentra en el PDCCH, indicando que los próximos enlaces descendentes de recursos está prevista para este UE.

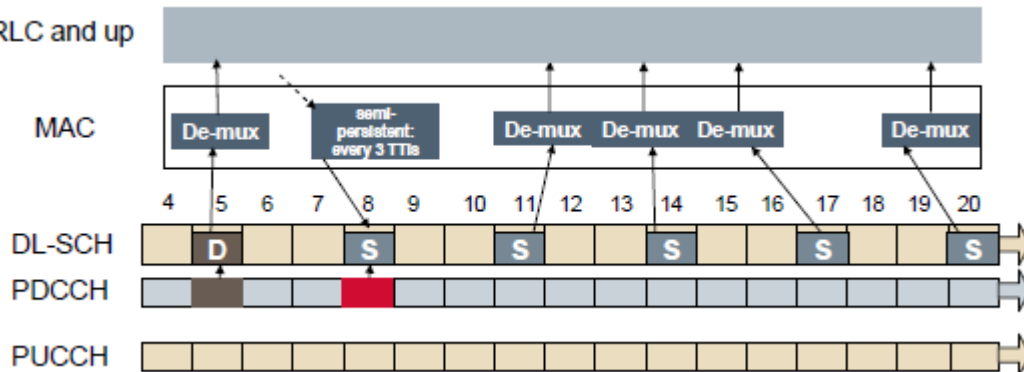


Figura 2. 13: Programación de enlace descendente con HARQ.  
Fuente:

La figura 2.14 por ejemplo añade el proceso de ACK/NACK a la figura 2.13. La HARQ genera un ACK o NACK, que se envía en el canal de control L1/L2 (PUCCH) sobre la subtrama  $n+4$ , para cada bloque de transporte de enlace descendente. Aquí hay un reconocimiento negativo, por lo que una subtrama necesita ser retransmitida utilizando HARQ.

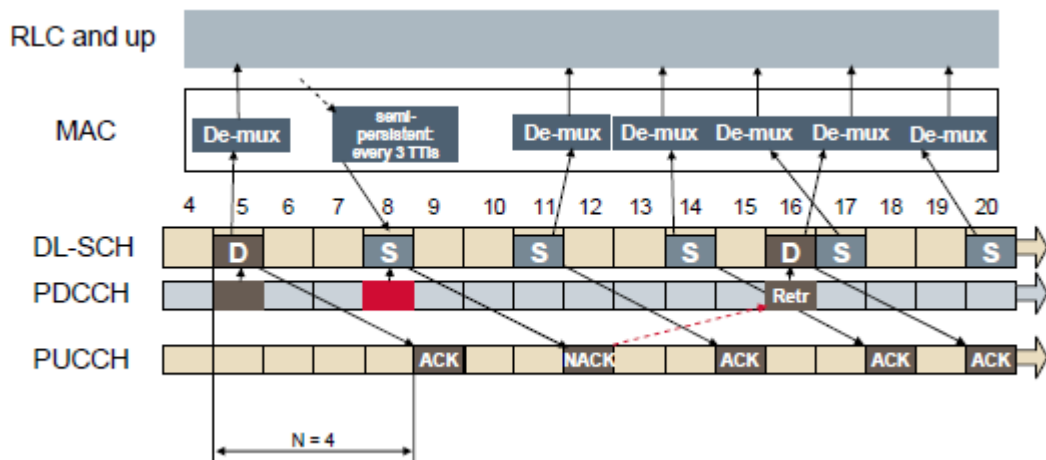


Figura 2. 14: Proceso de la programación de enlace descendente ACK/NACK.  
Fuente:

La retransmisión es señalada de forma dinámica y de enlace descendente, entonces se decodifica y se envía hasta las capas superiores. Finalmente la subtrama debe reconocerse de nuevo. El proceso puede llegar a ser bastante complicado cuando ambos reconocimientos y programación semi-persistente están involucrados.

### 2.3.1.3. Programación de enlace ascendente con HARQ

Al igual que con el enlace descendente, la información de programación de enlace ascendente se encuentra en el PDCCH. El C-RNTI indica que un próximo recurso de enlace ascendente está programada para este UE en 4 TTI. El 4 TTI de retardo entre que la disponibilidad de la ranura de enlace ascendente está presente para cuando realmente tiene que ser enviado, le da tiempo al UE para salir de la cola, que determinará la prioridad adecuada y determinará la mejor manera de almacenar en el bloque de transporte con información basada en los requisitos de QoS de la programación que está ejecutando localmente. En la figura 2.15 se muestra dicho proceso.

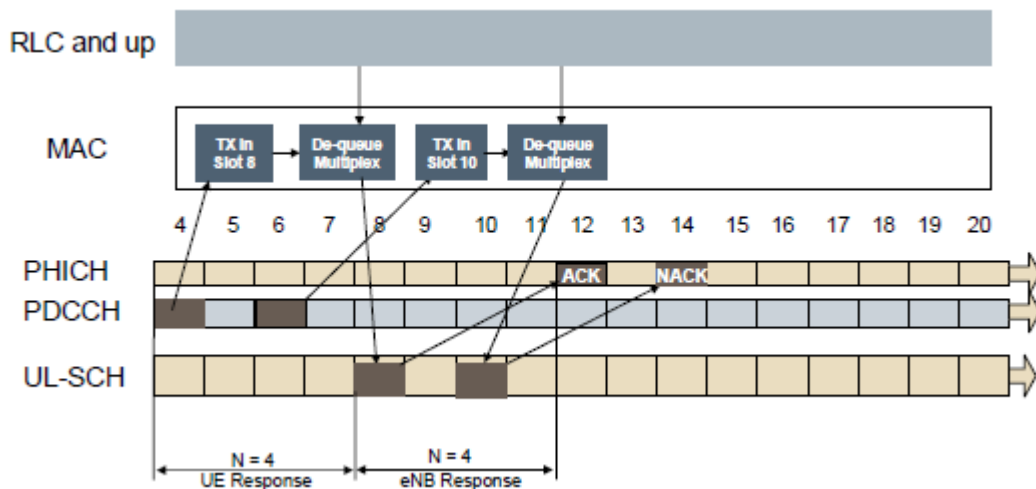


Figura 2. 15: Programación de enlace ascendente con HARQ.

Fuente:

La figura 2.16 se basa en la figura 2.15 para mostrar el proceso ACK/NACK. El canal indicador físico HARQ (PHICH) es un canal especial que proporciona retroalimentación del eNodo B de vuelta a la UE en el proceso para enlaces ascendentes HARQ. Llevan mensajes ACK/NACK de enlace descendente para bloques de transporte de datos. La HARQ es sincrónica, con un tiempo fijo de 4 TTI de enlace ascendente a ACK/NACK en el enlace descendente desde el eNodo B. El eNodo B responde con la oportunidad de retransmisión la cual es luego programada y retransmitida.

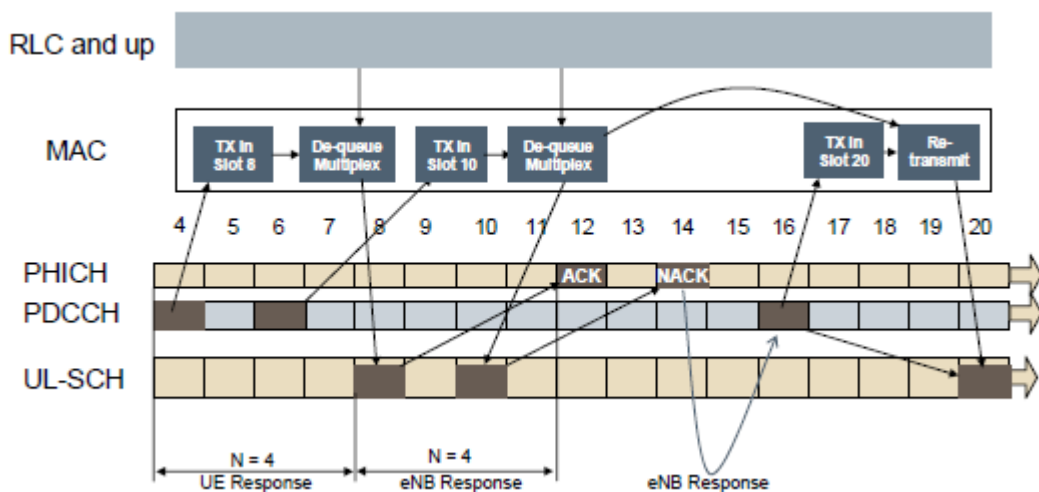


Figura 2. 16: Proceso de la programación de enlace descendente ACK/NACK.

Fuente:

## **Capítulo 3: Diseño y Resultados del modelo LTE**

### **3.1. Introducción a la plataforma OPNET.**

Previo al diseño de la red, se dará inicio a la explicación sobre los detalles del entorno de simulación OPNET que será utilizado para el modelado de la red de voz sobre LTE. Más adelante, se explicará brevemente los inconvenientes al momento de modelar la red LTE en OPNET y de las modificaciones realizadas en el modelado para resolver estos problemas. También, se detallarán los parámetros de configuración de la red LTE y la configuración de simulación de los modelos de procesos de VoIP y FTP en las siguientes secciones.

### **3.2. Descripción de la plataforma OPNET.**

El entorno de la plataforma OPNET, es una herramienta de simulación de eventos discretos que se utiliza en el análisis de la actuación de diversas redes de telecomunicaciones, por ejemplo LTE, WiMax, Wi-Fi y ZigBee. Esta plataforma tiene integrada una gran biblioteca de recursos, compuesta de varios modelos y gran variedad de protocolos (por ejemplo TCP, UDP, SIP, etc.) y también permite simular aplicaciones como voz, video, FTP, etc.

De acuerdo a esta breve descripción, el presente trabajo se encarga de modelar la red LTE bajo OPNET, en la cual utilizamos dos modelos como voz y FTP.

#### **3.2.1. Descripción general de Modelo LTE en OPNET**

La plataforma OPNET tiene un ambiente jerárquico que permite modelar diferentes redes y nodos. El modelado en OPNET de una red LTE

se ilustra en la figura 3.1, la misma consta de nodos móviles, un eNodo B y un EPC.

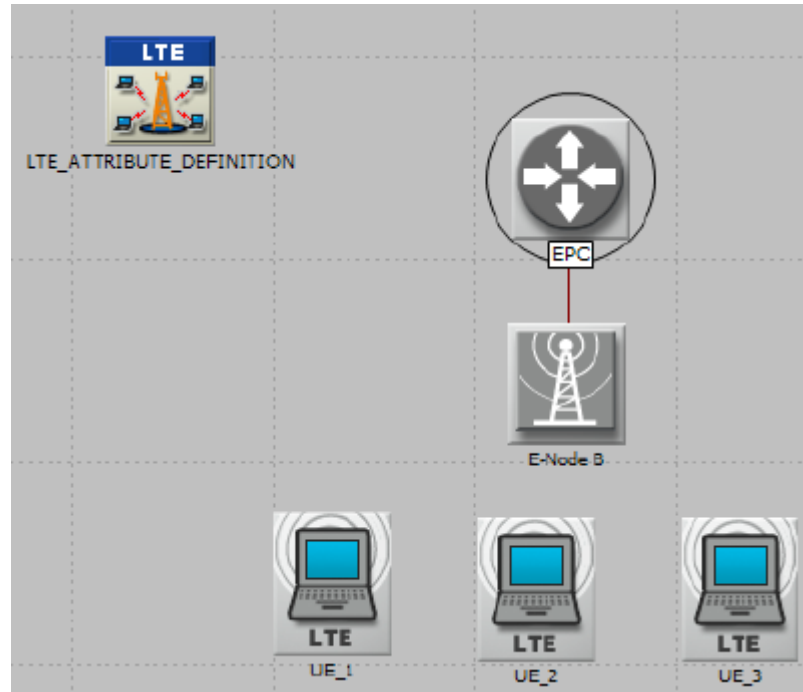


Figura 3. 1: Modelo de la red LTE.

Fuente:

El núcleo de la red LTE consiste en la MME, que sirve de puerta de enlace y la PDN como puerta de entrada, la cual es modelada por un solo dispositivo representada por la EPC mostrada en la figura 3.1. El nodo de definición de atributo LTE es utilizada para definir varios parámetros de configuración de las frecuencias DL y UL, del ancho de banda y de los diversos portadores configurados en los nodos móviles.

El modelo LTE implementa la mayor parte de las características que han sido estandarizadas por 3GPP, pero con ciertas limitaciones en el establecimiento de portadores, para la cual fue necesaria ciertas modificaciones significativas en el modelo para posterior análisis. En la figura 3.2 se muestra el flujo de la transmisión de datos para una red LTE.

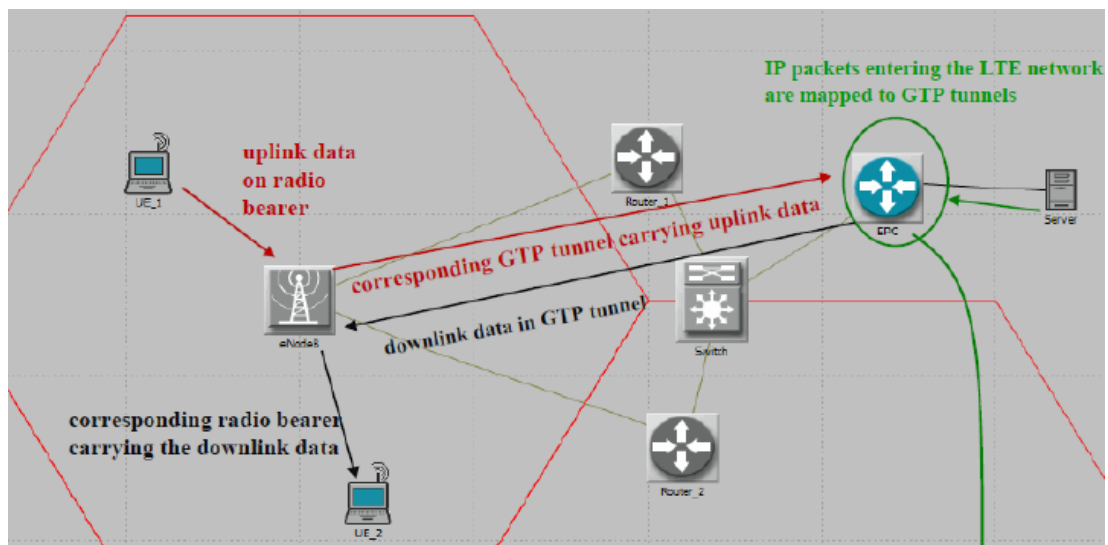


Figura 3. 2: Transmisión de datos en una red LTE.

Fuente:

Se ve que para cada portadora en la red de radio, hay un portador S1 correspondiente en la red de transporte. Este portador S1 utiliza el Protocolo de túnel de GPRS (GTP).

Por lo tanto, para cada portadora que se establece entre un usuario y una EPC, existe un túnel separado GTP establecido por el plano de control de señalización, así como los datos del plano de usuario. El túnel GTP de señalización, se utiliza para la transmisión de toda la información de señalización relacionada con el establecimiento del portador. El túnel GTP de datos es utilizado en el envío de todos los paquetes IP del plano de usuario desde el usuario al CPE y viceversa.

En la figura 3.3 se muestra la arquitectura completa del protocolo a través de varios nodos de la red LTE. La capa GTP-U en el e-Nodo B representa los túneles que se crean entre el eNodo B y EPC. En el enlace ascendente cuando el eNodo B recibe los paquetes IP desde el móvil, la capa GTP encapsula el paquete y copia el contenido de la cabecera IP interna a la cabecera IP externa de la IP recibida. El mismo proceso se repite



en la dirección de enlace descendente cuando el nodo EPC recibe un paquete IP desde fuera de la red LTE. La estructura del paquete de GTP encapsulado se muestra en la figura 3.4.

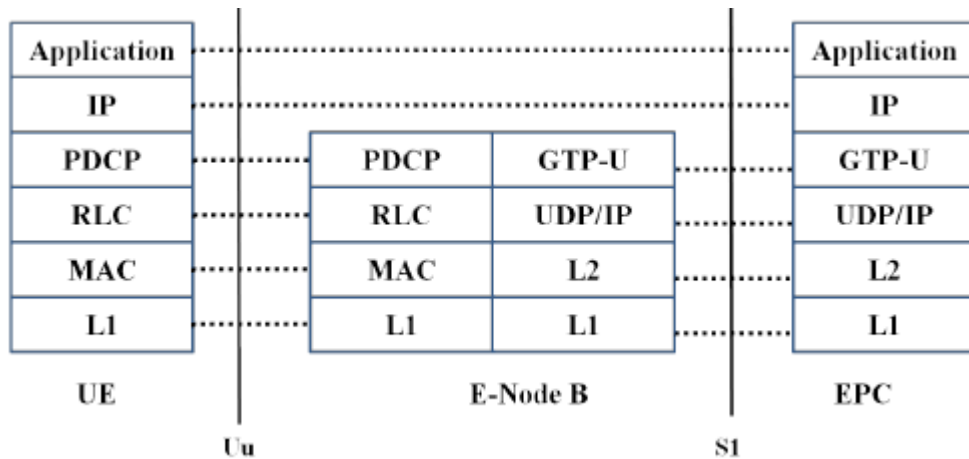


Figura 3. 3: Arquitectura a nivel de protocolos en una red LTE.

Fuente:

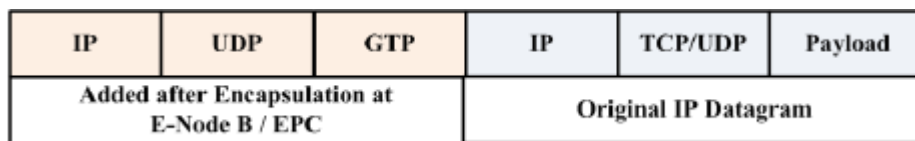


Figura 3. 4: Encapsulado de paquetes GTP.

Fuente:

### 3.2.2. Inconvenientes al modelar una red LTE.

Para el modelamiento en OPNET de la red LTE, el proceso de encapsulación GTP no se ejecuta de acuerdo a la calidad de servicio (QoS) del portador. Los paquetes que entran al eNode B durante el enlace ascendente son encapsulados en un paquete IP sin ningún tipo de clasificación basada en el tipo de portador (DSCP asigna a SER de forma predeterminada).

Para los enlaces descendentes ocurre el mismo problema del ascendente, es decir, que los paquetes que entran al nodo EPC son encapsulados sin clasificación adecuada. Debido a este problema, cuando

hay diferentes tipos de servicios como voz, FTP, HTTP, streaming de vídeo, etc., no existe una clasificación adecuada de los paquetes en el nivel IP de la red de transporte. Es decir, que los nodos intermedios de la red de transporte entre el eNodo B y EPC no son conscientes de la clasificación basada en los portadores.

La estrategia de programación utilizada en la red de transporte también no tiene sentido, si todos los paquetes se clasifican con misma prioridad. Por lo tanto, es muy importante para el eNodo B y el EPC para llevar a cabo la clasificación del nivel de paquetes mediante la asignación de tipo de portador de DSCP.

### **3.3. Simulación de la red de voz sobre LTE.**

En la presente sección se desarrolla la simulación en OPNET de una red de voz sobre LTE, para lo cual se detallará la configuración de los distintos nodos utilizados. En la figura 3.10 se muestra el tipo de topología de red utilizada para simular LTE, donde se observan dos células representadas por el eNodo B1 y eNodo B2 conectadas a la EPC a través de un enrutador Edge. Cada célula consta de 30 dispositivos móviles (por lo general celular tipo smartphone) que soportan LTE. El nodo EPC está conectado a una red IMS a través del enrutador Edge.

Los enlaces Ethernet entre el eNodo B y EPC llegan a velocidades de 5 Mbps, pero el resto de eslabones de la red principal llegan a 10 Mbps de capacidad. A través de los 2 servidores FTP que se encuentran conectados al nodo EPC, permiten el funcionamiento de los nodos móviles para el establecimiento de sesiones de FTP en la red LTE.

Los detalles de la configuración de cada uno de los nodos se explican en las secciones 3.3.1 y 3.3.2.

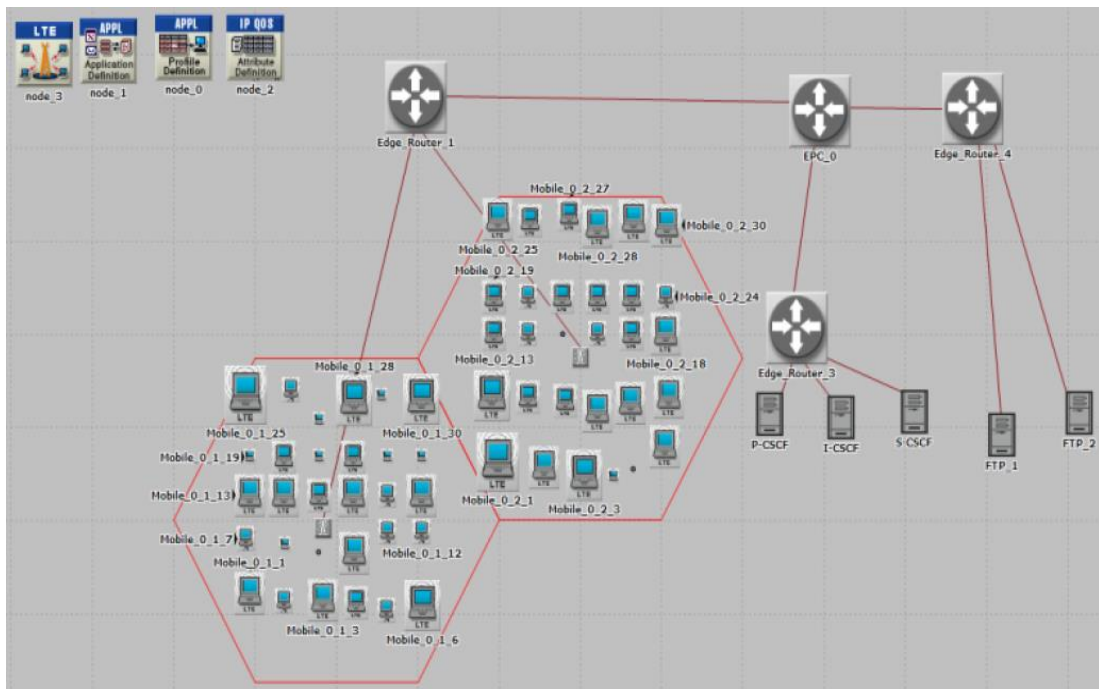


Figura 3. 5: Simulación en OPNET de la red de voz sobre LTE.

### 3.3.1. Nodos Móviles LTE.

Los nodos móviles LTE del presente trabajo son configurados para ejecutar servicios de VoIP (voz sobre IP) y FTP. Cada nodo móvil está configurado para ejecutar un tipo de aplicación a la vez. En la figura 3.6 muestra los detalles de configuración importantes de los nodos móviles en la red. Los portadores EPS debemos configurar los atributos para definir cuatro portadores que son: Platino, Oro, Plata y Bronce.

Tabla 3. 1: Tipos de portadoras para DSCP.

Tipos de Portadora	Punto de Código de Servicios Diferenciados (DSCP)
Platino	EF (101110)
Oro	AF 11 (001010)
Plata	AF 43 (100110)
Bronce	BE

Cada uno de los portadores está asignado a un filtro de paquetes TFT que para nuestro caso es el valor DSCP. En la tabla 3.1 se muestra la correlación entre el tipo de portador y el valor DSCP, dicha asignación es utilizado por los teléfonos móviles para identificar el tipo de portador para los diferentes tipos de servicios como voz, FTP, etc. La función de la movilidad en los nodos móviles está “Desactivado” porque asumimos que todos los móviles son estacionarios en el área alrededor del eNodo B.

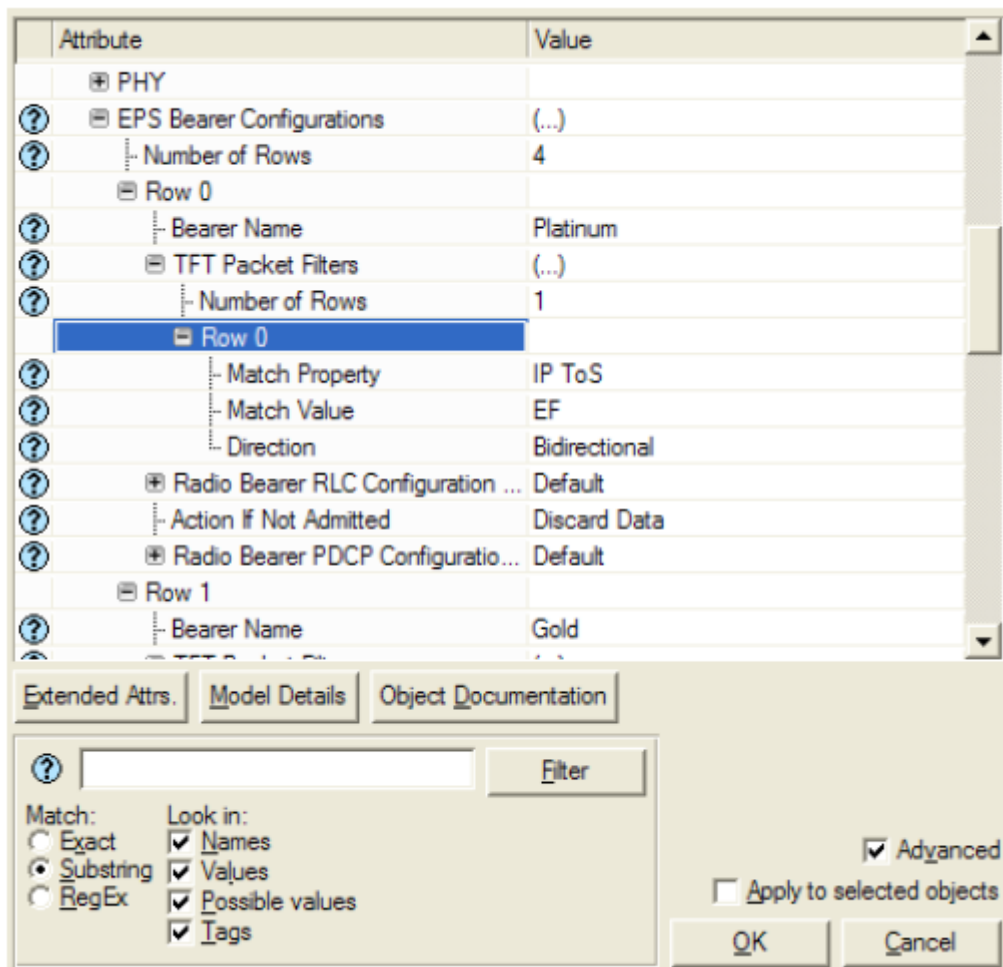


Figura 3. 6: Configuración de los nodos móviles.  
Elaborada por: El Autor.

### 3.3.2. eNodo B.

Para el eNodo B se configura la red con un ancho de banda de 3 MHz, cuya capacidad total de cada célula está limitada a 10 Mbps. El canal entre

los nodos móviles y el eNodo B son configurados para ser canales libres de error, como principal objetivo de este análisis es investigar el impacto de la congestión en la red central. De ahí que varios efectos de la capa física como por ejemplo los trayectos múltiples e interferencias de efectos no son modelados en la presente simulación.

El planificador MAC implementado en el módulo OPNET eNodo B utiliza una planificación por prioridades entre las portadoras de tasa de bits garantizados y no garantizados, lo que implica que los portadores de tasa de bits garantizados siempre asignan recursos de radio por delante de los portadores de tasa de bits no garantizados. Para evitar el escenario de paquetes caídos, debemos prescindir de la disponibilidad de recursos en la red de radio, el uso máximo de cada célula está limitado al 50% de la capacidad total. En tabla 3.2 se muestra el resumen de los parámetros de configuración del eNodo B.

Tabla 3. 2: Configuración de parámetros del eNodo B.

Nombre del Parámetro	Valor
Ancho de banda	3 MHz
Frecuencia Uplink	1920 MHz
Frecuencia Downlink	2110 MHz
Características del Canal	Libre de error
N° Antenas Tx/Rx	2

### 3.3.3. Modelo IMS.

El modelo IMS (Information Management System, Sistema de Gestión de la Información) para el presente entorno de simulación se utiliza la sección de modelos disponibles en la librería de OPNET Modeler. Este modelo, se compone de un proxy, que sirve para controlar las funciones de

control de sesión de llamada (P/I/S-CSCF), que son utilizados en procedimientos de señalización para llamadas VoIP entre los diferentes usuarios en la red. El flujo de señalización IMS en la red LTE requiere la más alta prioridad, ya que es el primer procedimiento que se invoca hacia el establecimiento de la llamada VoIP entre los usuarios. De ahí que todos los paquetes de señalización IMS están marcados con la máxima prioridad, tanto en la radio como en las redes centrales.

En la figura 3.7 se muestra la ventana de configuración de atributos del Proxy CSCF (Call Session Control Function, Función de Control de Sesión de Llamada) (P-CSCF) en la red IMS. El nombre de dominio y el área configurada en estos servidores también se configuran en los móviles y el uso de estos atributos registrados en cada uno de los móviles con la red IMS.

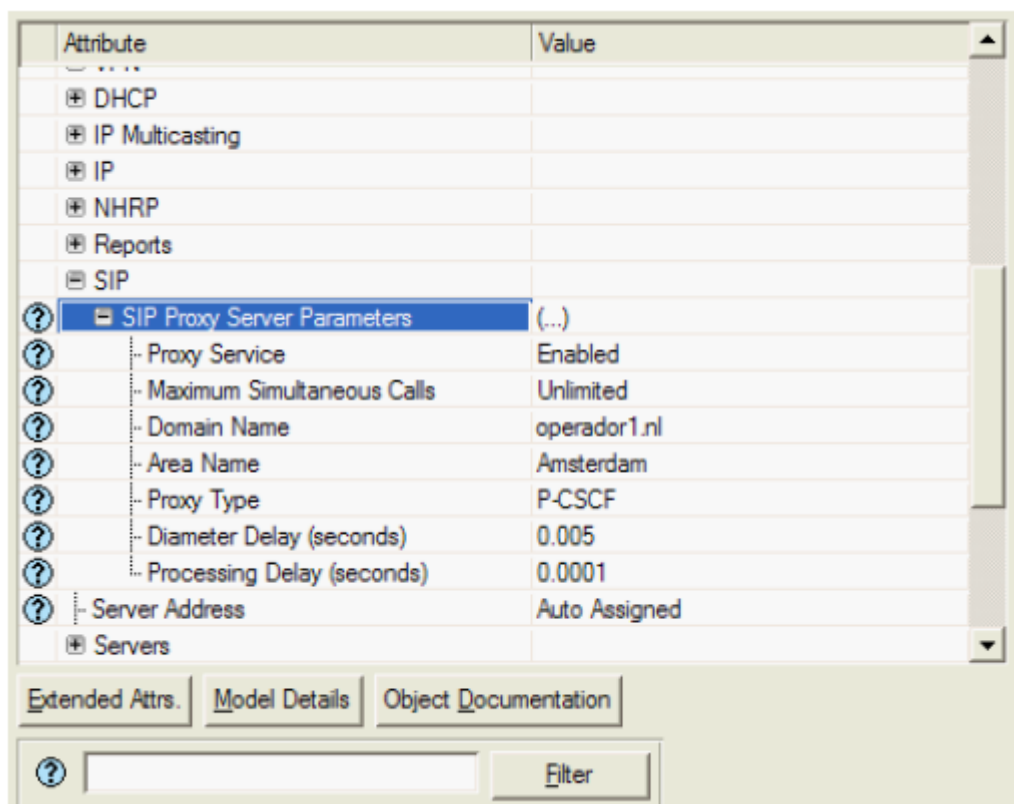


Figura 3. 7: Configuración de atributos de la función IMS Proxy.  
Elaborada por: El Autor.

Las funciones de control de sesión de tres llamadas se utilizan para encaminar la señalización entre dos usuarios de VoIP antes del establecimiento de la ruta del papel. El procedimiento de señalización SIP se define en <http://www.3gpp.org> y se sigue para establecer la VoIP de las llamadas entre los usuarios de la red.

El modelo IMS utilizado durante la simulación sólo permite emular el escenario del mundo real, como aspecto central de este trabajo es el portador de voz del plano de usuario y no sobre la señalización de datos del plano de control.

### **3.4. Configuración de la aplicación.**

En esta sección, para realizar el análisis utilizaremos dos modelos a saber, el de tráfico de voz y FTP, en donde los detalles de los modelos de tráfico se explican a continuación:

#### **a. Modelo de VoIP.**

Para este modelo utilizaremos el códec de voz G.711 para todas las simulaciones, dicho códec tiene una tasa de bits igual a 64 Kbps con 20 ms de tamaño de trama y 1 trama por paquete. Por lo tanto, hay 50 paquetes que son transmitidos por segundo. Mientras que las capas RTP/UDP/IP agregan encabezados para cada paquete y por lo tanto el ancho de banda total es de alrededor de 90 Kbps.

En nuestras simulaciones, se utiliza la supresión de silencio y es modelada como una distribución exponencial cuya longitud de conversación es igual a 1,2 s (media) y la longitud de silencio es igual a 0,8 s (media). En la tabla 3.3 se muestra en resumen los detalles de configuración del modelo de VoIP.

Tabla 3. 3: Parámetros de configuración de VoIP.

Nombre del Parámetro	Valor
Códec	G.711 (64 Kbps)
Tamaño de Trama	20 ms
Factor de la Actividad de voz	0.6
Supresión de silencio	Activado

**b. Modelo de FTP.**

El servidor FTP está configurado para enviar un archivo de tamaño 1 MB a petición de cada móvil. El tiempo de repetición entre las solicitudes es igual a 30 s. Hay una conexión separada TCP establecida para cada solicitud entre el móvil y el servidor.

**3.5. Resultados obtenidos en el modelado de LTE sobre IP.**

**3.5.1. Escenario 1.**

Este escenario será utilizado para mostrar la importancia de la calidad de servicio (QoS) en la red de transporte mediante la asignación de los usuarios de VoIP y FTP con la misma prioridad en la red de transporte. A continuación se describen dos casos:

**3.5.1.1. Descripción del escenario 1.**

- a. Caso 1:** En este caso, sólo el tráfico de voz se genera en la red. El número de usuarios de voz en la red se aumenta periódicamente de 20 a 100. Hay un total de 25 móviles LTE ejecutando la aplicación de VoIP en cada célula y cada usuario está configurado para establecer múltiples sesiones de VoIP simultáneamente. La sesión



de VoIP se realiza a través de una tasa de bits garantizada (GBR) al portador (QCI 1) y se asigna el mejor esfuerzo (DSCP-BE) de QoS en la red de transporte.

- b. Caso 2:** En este caso, tanto el tráfico de voz y FTP se generan en la red. El número de usuarios de voz es igual que el caso anterior y en totalidad hay 10 usuarios de FTP (5 en cada celda). Los usuarios de VoIP se asignan una GBR similar al caso 1 y los usuarios de FTP se asigna sin GBR (ver QCI 9 en la tabla 3.4) en los enlaces descendentes. Tanto VoIP y FTP se asignan el mejor esfuerzo de QoS en la red de transporte. Así, los paquetes que entran a los nodos EPC, Edge Router 1 y eNodo B1 y 2 son servidos con programación FIFO (primero en entrar primero en salir). Por lo tanto, el presente caso analiza el desempeño del servicio de VoIP cuando la red está congestionada con servicio de datos.

Tabla 3. 4: Definiciones de calidad de servicio (QoS) del portador EPS.

Identificador de clase de QoS (QCI, QoS Class Identifier)	Tipo de recurso	Prioridad	Retardo de paquetes	Tasa de error de pérdida de paquetes	Tipo de servicio
1	GBR	2	100	$10^{-2}$	Voz
2	GBR	4	150	$10^{-3}$	Conversación por voz (Tx en tiempo real)
3	GBR	3	50	$10^{-3}$	Juegos en tiempo real
4	GBR	5	300	$10^{-6}$	Conversación sin video
5	Sin GBR	1	100	$10^{-6}$	Señalización IMS
6	Sin GBR	6	300	$10^{-6}$	Video
7	Sin GBR	7	100	$10^{-3}$	Juego interactivo
8	Sin GBR	8	300	$10^{-6}$	Video
9	Sin GBR	9	300	$10^{-6}$	Video

### 3.5.1.2. Análisis de los resultados

En las figuras 3.8 y 3.9 se muestran la media (promedio) final para poner fin al retardo y la media de las variaciones del retardo de paquetes para los usuarios de VoIP en la red, respectivamente. Para el caso 1, el retraso es constante en 80 ms mientras que cuando hay una sesión FTP en curso del caso 2, hay un aumento significativo en el retardo extremo a extremo para los usuarios de VoIP.

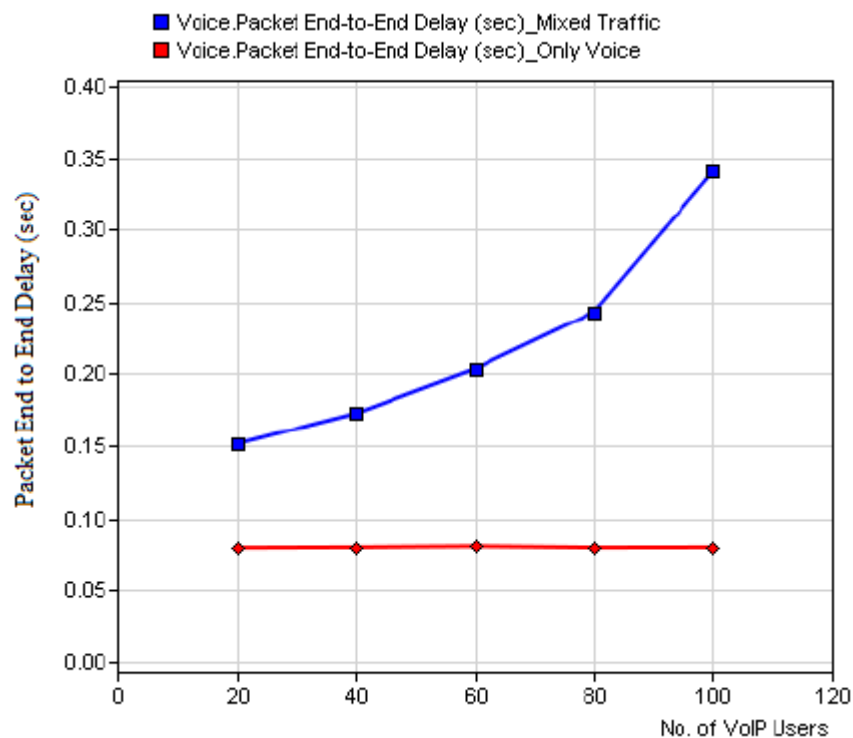


Figura 3. 8: Retardo extremo a extremo de paquetes de voz vs número de usuario de VoIP.

Elaborada por: El Autor.

En el caso 1, puesto que hay solamente usuarios de VoIP presentes en la red, el tráfico total en el vínculo entre el encaminador de borde 1 y el EPC está todavía dentro del ancho de banda total incluso cuando el número de usuarios de VoIP es grande. Con 100 usuarios de VoIP el tráfico máximo que se puede esperar es 9 Mbps. Este valor se llegó en el supuesto de que todos los usuarios están enviando paquetes de voz al mismo tiempo y el

ancho de banda requerido para una sola llamada de voz es de 90 Kbps después de añadir las cabeceras RTP/UDP/ IP para la carga útil de voz real.

El tráfico máximo nunca será alcanzado, ya que cada usuario tiene una distribución exponencial para múltiples conversaciones y para períodos de silencio. Por lo tanto, el retardo promedio extremo a extremo para todos los usuarios de VoIP en la red permanece constante. Esto explica también en la figura 3.9, que muestra ninguna variación en el retardo entre los paquetes recibidos en el móvil.

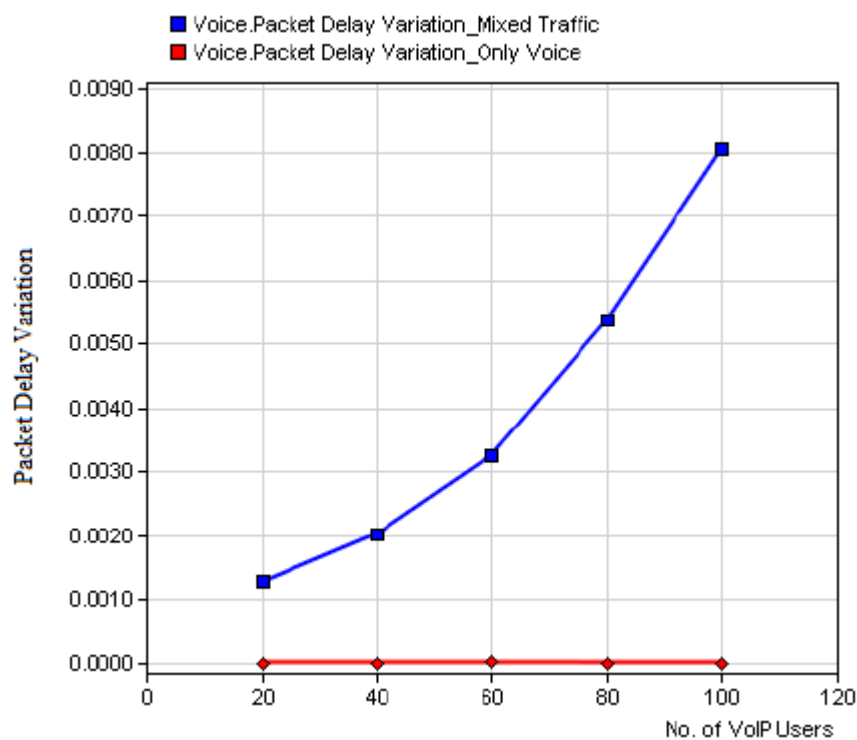


Figura 3. 9: Variación de retardo de paquetes vs número de usuarios de VoIP.  
Elaborada por: El Autor.

En el caso 2, ya que no hay prioridad entre voz y FTP, los paquetes de VoIP más pequeñas están en cola en la red central y el encaminador de borde hasta que los paquetes FTP más grandes se procesan en cada nodo. Esto provoca una mayor variación entre los paquetes recibidos en el móvil como puede ver en la figura 3.9. El retardo mínimo medio es 150 ms, cuando

el número de usuarios de VoIP es 20 y es mucho mayor que el límite aceptable de 100 ms.

Desde el escenario, es evidente que para lograr una QoS aceptable para de VoIP en LTE, es necesario que haya una clasificación adecuada de la red de transporte.

## **Capítulo 4: Conclusiones y Recomendaciones.**

### **4.1. Conclusiones.**

1. El presente trabajo de grado se analizó el desempeño de voz sobre LTE cuando la red de transporte está congestionada con tráfico de datos. El análisis se llevó a cabo utilizando la herramienta de simulación OPNET.
2. El modelo LTE en OPNET tuvo limitaciones significativas en la clasificación de las portadoras de la red de transporte. Esto llevó a una situación en la que no había orden de prioridad de los portadores de la red de transporte.
3. La importancia de la clasificación de tráfico de voz y datos en la red de transporte se mostró en el análisis de los resultados, sin clasificación adecuada, vemos que hay un aumento del 50 por ciento en el paquete extremo a extremo del retardo para la voz, incluso cuando no hay congestión en la red de transporte.

### **4.2. Recomendaciones.**

1. La utilización del control de admisión (entrada) es otro aspecto que debe ser investigado. La mayoría de los estudios que se han realizado en esta área se centran en la red de radio es decir, se estudia el uso de control de admisión cuando hay congestión en la red de radio. Pero cuando el control de admisión tiene en cuenta la disponibilidad de recursos en las redes tanto en la radio y de núcleo, el uso eficiente de enlace en la red de transporte se puede lograr sin aumentar la capacidad del enlace en la red de transporte.

2. Que se realicen trabajos de grado para la Maestría en Telecomunicaciones aplicando diferentes tipos de servicios que disponen de una serie de requisitos de QoS sobre sistemas de comunicaciones modernos.

## Referencias Bibliográficas

Abdullah, M. & Yonis, A. (2012) *Performance of LTE Release 8 and Release 10 in Wireless Communications. Cyber Warfare and Digital Forensic (CyberSec), 2012 International Conference on Cyber Security*

Dahlman, E., Parkvall, S., and Sköld, J. (2011). *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Elsevier Ltd., 2011, pp. 1- 412.

Escobar L., M. C. (2010). *La próxima generación de telefonía móvil 4G: LTE y Wimax, Estado del Arte*. Bit, ISSN 0210-3923, N°. 183, págs. 77-83.

Garkusha, S. V. (2013). *Analysis results for distribution methods of time-frequency downlink resource of LTE technology*. Microwave and Telecommunication Technology, Pag. 468 - 469.

Ghosh, A., Zhang, J., Muhamed, R., & Andrews, J. (2010). *Fundamentals of LTE*. Prentice Hall, Pag. 464.

Osa G., V. (2013). *Planificación y Optimización Automática de Redes Móviles LTE*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Disponible en la página web: <http://riunet.upv.es/handle/10251/29755>

Miñarro L., A. (2009). *LTE/SAE, una apuesta segura en la evolución de las redes móviles*. Antena de Telecomunicación, N° 176. Pag. 27 – 31.

Montilla B., A. (2009). *Arquitectura de red de acceso móvil de cuarta generación: Mobile-IP RAN*. Tesis Doctoral publicada por la Universidad Carlos III de Madrid. Disponible en línea: [http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/6739/TESIS\\_Alberto\\_Montilla\\_CD\\_250609.pdf](http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/6739/TESIS_Alberto_Montilla_CD_250609.pdf)

Núñez C., J. A. (2013). *Diseño de una red de nueva generación LTE-A para una zona urbana en Bogotá bajo el estándar 3GPP y la recomendación ITU-R M.1457*. Tesis de Maestría publicada por la Universidad Nacional de Colombia. Disponible en línea: <http://www.bdigital.unal.edu.co/11717/1/2300612.13.pdf>

Pin-Jen, L., & Yi-Bing, L. (2014). *An IP-based packet test environment for TD-LTE and LTE FDD*. Communications Magazine, IEEE (Volume: 52, Issue: 3 )

Quintero F., V. M., Zuñiga M., J. S., Córdoba M., F. (2013). *Análisis del desempeño a nivel físico del enlace de bajada de la evolución a largo término (LTE)*. Gerencia Tecnológica Informática, ISSN 1657-8236, Vol. 12, N°. 34, págs. 75 – 90.

Sanqing, H., Ye, O., Yu-Dong, Y., Hosein, M. & Wenyuan, L. (2014). A study of LTE network performance based on data analytics and statistical modeling. Wireless and Optical Communication Conference (WOCC), 2014 23rd.

Sesia, S., Toufik, I., and Baker, M. (2011). *LTE–The UMTS Long Term Evolution from Theory to Practice*. John Wiley & Sons, Ltd., 2<sup>nd</sup> ed., Pag. 3 – 19.

Stanze, O., & Weber, A. (2013). *Heterogeneous networks with LTE-Advanced technologies*. Bell Labs Technical Journal. Pag. 41 – 58.

Wang, E., & Chan, P. (2010). *Fundamentals of LTE Standards and Technologies*. Developed exclusively for IEEE Expert Now.