



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Análisis de tráfico de voz sobre IP (VoIP)

en redes LTE

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

PRESENTA:

DÍAZ SÁNCHEZ JUAN RODRIGO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. VICTOR RANGEL LICEA



MÉXICO, D.F., CIUDAD UNIVERSITARIA MAYO 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. Jesús Reyes García.

Secretario: M.I. Juventino Cuellar González.

Vocal: Dr. Víctor Rangel Licea.

1er Suplente: Dr. Javier Gómez Castellanos.

2do Suplente: Ing. Javier Ortiz Villaseñor.

Lugar donde se realizó la tesis: Facultad de Ingeniería

DIRECTOR DE TESIS:

DR. LICEA RANGEL VICTOR

FIRMA

Agradecimientos.

A la vida, por poner ante mí, las oportunidades que me han permitido llegar hasta este punto de mi vida, que sin duda alguna, han sido gratificantes sobremanera e incluso, algunas han sido inesperadas.

A mis padres, Juan y Olga, que han hecho de mí una persona responsable, de trabajo, dedicada y que no teme a los retos que se presenten. Forjando mi carácter para no ceder ante las inclemencias de las dificultades que puedan surgir y sobre todo por darme la libertad de ser siempre yo quien sea el único límite para alcanzar mis metas. El logro es suyo también.

A mis hermanos, Norma, Patricia y Ernesto, que sin duda alguna han sido un apoyo incondicional a lo largo, no únicamente de mi formación universitaria, si no a lo largo de toda mi vida.

A todos los amigos que he cosechado a lo largo de mi camino y sobre todo que se han quedado a mi lado en cada una de las etapas de la misma, desde mi educación secundaria, preparatoria, hasta la universidad, y que me han brindado su inconmensurable amistad, comprensión y apoyo. No me bastaría una página para mencionarlos a todos.

A los profesores que he tenido oportunidad de conocer a lo largo de mi formación académica y los cuales han aportado sus valiosos conocimientos en aras de hacer de mí una persona competitiva y culta.

Reconocimientos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Ingeniería. Por permitirme vivir una de las mejores etapas de mi vida a través de sus aulas y pasillos. Con orgullo, mi Alma Mater, que me ha brindado la oportunidad de realizar mis estudios de licenciatura y poder pertenecer a la máxima casa de estudios.

A mi director de tesis, Dr. Víctor Rangel Licea.

Por brindarme el apoyo y paciencia necesarios para la realización de este arduo trabajo. Sin duda, su presencia fue primordial durante el proceso de elaboración de la presente tesis. Ha sido un privilegio pertenecer a sus alumnos tesistas.

Al PAPIIT que con el proyecto No. 11471, titulado “Diseño y análisis de algoritmos de calendarización en redes LTE y WiMAX” ha hecho posible la adquisición de las licencias del software OPNET MODELER.

Al CONACYT, gracias por el apoyo brindado a través del proyecto 105279 “Diseño de técnicas de reservación de capacidad de redes BWA móviles” y por el apoyo económico a mi persona a través de una beca.

Resumen.

El presente trabajo de tesis se basa en el funcionamiento de redes LTE, particularmente en las capacidades de la red para admitir a cierta cantidad de usuarios que desean realizar llamadas de voz.

LTE basa su funcionamiento en la conmutación de paquetes, por lo que la transmisión de información entre los elementos de la red se realiza sobre el protocolo de internet IP, en consecuencia, las llamadas se realizan sobre protocolos que puedan hacer uso de redes de paquetes IP. Así, la voz necesita ser digitalizada para su posterior envío, este proceso se lleva a cabo mediante varios y distintos codecs, que muestrean y codifican la voz.

Los recursos de los que dispone una red LTE, varían en función del ancho de banda del que se pueda hacer uso y del modo de duplexado empleado, que puede ser TDD (Time Division Duplex) o FDD (Frequency División Duplex), así como de la modulación y la tasa de codificación que pueda usarse. Esto hace muy dinámicas a las redes LTE. En consecuencia la capacidad que se tenga para la realización de llamadas de VoIP depende del códec que se utilice, del modo de operación, la modulación y la codificación empleada.

En este trabajo de tesis se presenta un modelo teórico que calcula la cantidad de recursos (una vez que se han quitado los recursos del sistema que son asignados a control), que pueden ser asignados a los usuarios que desean realizar una llamada de voz. El modelo, posteriormente se valida mediante simulaciones hechas con OPNET MODELER.

Índice de contenido.

Capítulo 1. Introducción.....	11
1.1 Panorama de las comunicaciones móviles.....	11
1.2 Planteamiento del problema.....	13
1.3 Objetivos y contribuciones.....	14
1.4 Metas.....	15
1.5 Metodología.....	15
1.6 Estructura de la tesis.....	15
Capítulo 2. Conceptos básicos de redes celulares.....	17
2.1 Introducción.....	17
2.2 Fundamentos de comunicaciones móviles.....	18
2.3 Evolución de las comunicaciones móviles.....	21
2.4 Sistemas MIMO.....	23
2.5 Redes de banda ancha.....	24
2.6 Arquitectura general de sistemas celulares.....	24
2.7 Arquitectura general de redes 3GPP.....	26
2.8 Arquitectura de redes LTE.....	28
2.9 Protocolos y estándares de la tecnología LTE.....	32
2.10 Estado actual de las redes LTE.....	35
Capítulo 3. Capa física de LTE.....	37
3.1 Introducción.....	37
3.2 Modulación y codificación en LTE.....	38
3.3 Transmisión OFDM.....	40

3.4 Concepto de bloque de recursos.....	42
3.5 Estructura de trama.....	44
3.6 Descripción de los enlaces ascendente y descendente.....	47
Capítulo 4.- La capa de enlace de LTE.....	51
4.1 Introducción.....	51
4.2 División de la capa de enlace.....	52
4.3 El servicio de <i>Scheduling</i> en LTE.....	57
4.4 Mecanismos de solicitud para la asignación y asignación de recursos.	59
4.5 Parámetros de QoS en LTE.....	60
Capítulo 5. Aspectos teóricos, VoIP y flujo de datos.....	63
5.1 Introducción.....	63
5.2 Proceso de codificación de VoIP.....	64
5.3 Cálculos para el flujo de datos.	65
Capítulo 6 Modelo teórico para el cálculo de throughput y capacidad de llamadas de VoIP.....	69
6.1 Introducción.....	69
6.2 Consideraciones generales del modelo teórico.....	70
6.3 Ubicación de canales y cálculo de throughput.....	71
6.4 Throughput de enlace descendente.....	75
6.5 Throughput de enlace ascendente.....	77
6.6 Ejemplo de cálculo de throughput.....	79
6.7 Cálculo de la capacidad de llamadas.....	82

Capítulo 7. Resultados.....	84
7.1 Organización de los resultados.....	84
7.2 Resultados obtenidos para el throughput.....	85
7.3 Resultados para el canal de 3 MHz.....	87
7.4 Validación del modelo teórico para el canal de 3 MHz.....	93
7.5 Resultados para el canal de 20 MHz.....	98
7.6 Resumen final de resultados.....	105
Capítulo 8. Conclusiones.....	106
8.1 Conclusiones.....	106
8.2 Visión a futuro.....	107

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 Modos FDD y TDD.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.2 Efecto multitrayectoria.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.3 Interferencia Inter-Símbolo.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.4 Arquitectura general de una red de telefonía celular.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2.5 Arquitectura de redes 3GPP.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.6 Arquitectura de red LTE.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 2.7 Bearers usados por la red LTE.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 2.8 Torre de protocolos del plano de usuario.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 2.9 Torre de protocolos del plano de control.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.1 Constelaciones de las modulaciones (a) QPSK y (b) QAM.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3.2 Espectro de señales OFDM.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 3.3 Método de acceso OFDMA.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 3.4 Bloque de recursos físicos (PRB).....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 3.5 Estructura de trama tipo 1.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3.6 Estructura de trama tipo 2.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 3.7 Índice TDD.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4.1 Mapeo de los canales en el enlace descendente.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4.2 Mapeo de los canales en el enlace ascendente.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4.3 Flujo de datos.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4.4 Scheduling LTE.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5.1 Proceso de VoIP.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5.2 Estructura del paquete de VoIP.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 6.1a Localización de los canales de control y datos en TDD.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 6.1b Localización de los canales de control y datos en TDD.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 7.1 Llamadas admitidas en el UL.....</i>	<i>89</i>

<i>Figura 7.2 Llamadas admitidas en el DL.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 7.3 Llamadas admitidas en el UL.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 7.4 Llamadas admitidas en el DL.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 7.5 Topología de red LTE.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 7.6 End to End Delay vs UEs activos.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 7.7 Throughput generado según se agregan UEs</i>	<i>96</i>
<i>Figura 7.8 Porcentaje de utilización del canal PUSCH.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 7.9 Porcentaje de utilización del canal PDSCH.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 7.10 Diagrama de propagación con modulación y c.r.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 7.11 Llamadas admitidas en el UL.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 7.12 Llamadas admitidas en el DL.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 7.13 Llamadas admitidas en el UL.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 7.14 Llamadas admitidas en el DL.....</i>	<i>103</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1 Evolución de la telefonía celular.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 3.1 Índices de CQI.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 3.2 Tasas de codificación para LTE.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 3.3 Relación entre el ancho de banda del sistema y el número de PRBs.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 3.4 Categorías de equipos de usuario.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 3.5 Configuración de la subtrama especial.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 4.1 Campos del QCI para QoS en LTE.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 5.1 Codecs usados en VoIP.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 5.2 Valores de MOS.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 5.3 Tasas y carga para los codecs VoIP.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 5.4 Throughput máximo en el enlace descendente para FDD.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 5.5 Throughput máximo en el enlace ascendente para FDD.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 5.6 Throughput para el modo TDD.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 6.1 PRBs asignados al PUCCH.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 7.1 Resultados de throughput para el sistema de 3 MHz.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 7.2 Resultados de throughput para el sistema de 20 MHz.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 7.3 Parámetros del sistema para un canal de 3 MHz.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 7.4 Throughput y llamadas admitidas para MCS = 9 y 3 MHz.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 7.5 Throughput y llamadas admitidas para MCS = 28 y 3 MHz.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 7.6 Parámetros de OPNET MODELER.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 7.7 Relación de distancia y SNR para los índices MCS 9 y 28.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 7.8 Parámetros del sistema para un canal de 20 MHz.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 7.9 Throughput y llamadas admitidas para MCS = 9 y 20 MHz.....</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 7.10 Throughput y llamadas admitidas para MCS = 28 y 3 MHz.....</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 7.11 Resumen final de resultados.....</i>	<i>105</i>

CAPÍTULO 1

Introducción.

1.1 Panorama de las comunicaciones móviles

Desde su aparición en la década de 1970, la telefonía móvil ha tenido un desarrollo ininterrumpido, en gran parte debido al alto impacto que genera en la forma en que nos comunicamos. Los sistemas celulares han ido evolucionando desde la primera generación AMPS (*Advanced Mobile Phone System*), donde el único servicio soportado era la transmisión de voz. Posteriormente con el estándar de segunda generación GSM (*Global System for Mobile communications*) donde además del servicio de voz, se introduce por primera vez el servicio de mensajes de texto SMS (*Short Message Service*), después mediante su extensión denominada GPRS (*General Packet Radio System*) se hace posible la transferencia de datos y el acceso a internet.

Durante el año 2000 aparecen los sistemas de tercera generación como UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) y HSPA (*High Speed Packet Access*) que logran un notable incremento en las velocidades de transferencia de datos y calidad de servicio. Dichos sistemas son compatibles con sus antecesores lo que se reflejó en una mayor cobertura y aumento en el número de suscriptores. En México la Comisión Federal de Telecomunicaciones (COFETEL) reporta que la base de usuarios de telefonía móvil es de 102.6 millones hasta Junio de 2013.

Con el incremento de suscriptores, se requería un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles para poder solventar las demandas de los usuarios. Actualmente una de las aplicaciones que más demanda genera es el acceso a internet, puesto que cada vez más usuarios solicitan servicio y lo desean en prácticamente cualquier lugar, la 3GPP (*Third Generation Partnership Project*), creadora del sistema UMTS y encargada del mantenimiento de GSM, se da a la tarea de desarrollar un nuevo sistema que cubra las demandas de tráfico y usuarios. Así pues en 2008 nace un nuevo sistema denominado LTE (*Long Term Evolution*).

LTE tiene el objetivo de hacer más eficiente el uso del espacio radioeléctrico, lograr velocidades de transferencia más altas y tener mayor capacidad en los servicios soportados. Sin embargo hay que hacer una distinción entre LTE y los sistemas 4G. LTE es un sistema 3.9G según el IMT-Advanced [1], pues no cumple con los requerimientos para formar parte de los sistemas de cuarta generación, los cuáles deben proporcionar mejoras en los siguientes aspectos:

Eficiencia espectral, menor latencia para permitir la operación de nuevas aplicaciones sensibles al retardo, bajo costo, compatibilidad con diversas redes, altas tasas de transferencia, admitir una amplia gama de servicios y aplicaciones y movilidad de alto rango. Aunque LTE no cumple con los requerimientos mínimos de un sistema 4G, es común que se comercialice como un sistema 4G con el único fin de lograr que el producto llegue a los usuarios y se vayan familiarizando.

LTE introduce muchas variantes en relación a sus predecesores, sin embargo existen algunos aspectos relevantes que cabe destacar; por primera vez todos los servicios, incluida la voz, se soportan sobre el protocolo IP (*Internet Protocol*), las velocidades pico pueden alcanzar hasta 100 Mbps, el uso de OFDMA (*Orthogonal Frequency Division*

Multiple Access) como interfaz de radio y ancho de banda escalable, donde se tiene la posibilidad de trabajar con canales de distintos anchos de banda que van desde 1.4 MHz hasta 20 MHz. A diferencia de estándares de comunicaciones móviles anteriores como GSM y UMTS, donde existen diferentes dominios para otorgar los servicios de voz y datos, el estándar LTE brinda todos sus servicios basándose en el protocolo IP y por lo tanto trabaja únicamente con conmutación de paquetes.

Gracias a esto, LTE puede brindar múltiples servicios a una elevada cantidad de suscriptores, estableciendo para cada uno de ellos una serie de parámetros que definen el enlace, como; la prioridad del servicio, el ancho de banda del canal de acceso, el modo de operación (FDD o TDD), la modulación utilizada, potencia máxima de transmisión, el tipo de servicio del que se trata (voz, datos, videoconferencia, etc.) y lo más importante el tipo de calidad de servicio (QoS) al cual el suscriptor tiene derecho. Lo anterior de acuerdo al contrato que el suscriptor tenga con la compañía prestadora de servicios.

1.2 Definición del problema

Debido a que LTE es un sistema reciente resulta importante contar con una gama de estudios prácticos que permitan evaluar el rendimiento de esta tecnología. De manera específica el estudio de QoS (*Quality Of Service*) en la transmisión de voz (VoIP), resulta de vital importancia para determinar la capacidad de esta tecnología para soportar una determinada cantidad de usuarios cuyas llamadas tengan una calidad aceptable independientemente de si hay o no otros servicios que solicitan recursos ya que una llamada debe de mantenerse activa hasta que el usuario mismo la termine.

El objetivo de cualquier servicio de voz es asegurarse de proporcionar una buena calidad de servicio así como una baja latencia. LTE emplea diferentes mecanismos para proporcionar el servicio de voz tales como:

- VoLGA (*Voice over LTE Generic Access Network*): basado en los estándares actuales de la 3GPP para la red de acceso genérica cuyo objetivo es permitir a los usuarios de LTE la posibilidad de traspasar una llamada a un dominio de conmutación de circuitos para las redes GSM UMTS.

- VoLTE: basado en el sistema IMS desarrollado por la 3GPP que establece las reglas para una llamada de extremo a extremo, hacia una llamada fuera del alcance de una celda, de roaming y la interconectividad con sistemas anteriores.
- CSFB (*Circuit Switched Fall-Back*): esencialmente utiliza una variedad de procesos y elementos de red para permitir recurrir a la conmutación de circuitos 2G o 3G antes de que la llamada sea iniciada. La especificación también permite el envío de SMS, para ello el teléfono utiliza una interfaz conocida como SG, que permite que los mensajes se envíen a través de un canal LTE.
- VoIP: es el mecanismo o estándar más común y con el cual se tiene una mayor experiencia en el manejo de la calidad de llamada que se obtienen con cada uno de los codecs que son posibles implementar. Sería la opción más sencilla de implementar por los prestadores de servicios.

Haciendo hincapié en los mecanismos VoLTE y VoIP como base del funcionamiento de LTE para dar soporte a las transmisiones de voz, el presente trabajo de tesis se centra en un modelo teórico que permita evaluar la capacidad de llamadas de VoIP

1.3 Objetivos y contribuciones

El objetivo del presente trabajo de tesis es presentar un modelo teórico que permita evaluar la cantidad de llamadas que son admitidas por una estación base LTE empleando diversos tipos de codecs. Dicho modelo se centra en un canal de 3MHz con modo de duplexación TDD y que servirá como sistema de caracterización. Posteriormente el modelo es aplicado a un canal de 20 MHz con el fin de obtener información del sistema más completo y robusto que puede ser utilizado por los operadores. Además, puesto que la codificación empleada tiene un gran impacto en la capacidad de llamadas, en el modelo es posible manipular dicho parámetro de forma dinámica. El modelo se centra en el análisis detallado de la rejilla de recursos de LTE aplicada en los dominios de tiempo y frecuencia.

Con base en los resultados obtenidos, se pretende demostrar que un canal de LTE de 20 MHz, tiene implementados en su capa de enlace mecanismos de control que le permiten aplicar distintos codecs para soportar el servicio de VoIP a una determinada cantidad de

usuarios de forma simultánea. De forma complementaria, la presente tesis podrá servir como base y guía conceptual para estudios posteriores de LTE así como para realizar una comparativa con la red WiMAX.

1.4 Metas.

Obtener un modelo teórico que nos permita tener datos fiables sobre las llamadas admitidas de acuerdo al códec que los equipos de usuario estén empleando y el impacto que genera el uso de un determinado índice de modulación y codificación en la capacidad propia de la red LTE.

1.5 Metodología.

Para realizar el presente trabajo de tesis el modelo teórico propuesto es implementado sobre el software MATLAB y para fines de corroboración de resultados se emplea el software OPNET MODELER, cuyas licencias para las redes Wifi y LTE se adquirieron a través de dos proyectos de investigación (PAPIIT 11471 y CONACYT 105279), los cuales tienen como marco de estudio el diseño de nuevas técnicas de reservación de recursos y el análisis de redes Mesh, WiMAX y LTE.

1.6 Estructura de la tesis.

El capítulo 2 contiene los conceptos básicos necesarios para comprender una red celular y los principios de las comunicaciones inalámbricas. Conforme se avanza, el capítulo muestra los sistemas MIMO y el impacto que genera en las tasas pico de transmisión que son posibles de lograr. Por otro lado se da información sobre los elementos que generan una red celular y de forma más detallada, los elementos que conforman un sistema LTE.

En el capítulo 3 se tratan los aspectos fundamentales de la capa física del sistema LTE, los conceptos de PRB, RE y toda la información concerniente a la configuración de las tramas LTE.

Para el capítulo 4 se tiene un desarrollo de los conceptos concernientes a la capa LTE y su división en las subcapas PDCP, RLC y MAC, así como las funciones que realiza cada subcapa y la forma en que se relacionan unas con otras.

En el capítulo 5 se desarrollan los conceptos de flujo de datos en un proceso de comunicación de VoIP, algunos de los diferentes codecs que se emplean en la actualidad y las tasas de transmisión que generan cada uno a nivel de la capa IP y a nivel de la capa física de LTE.

En el capítulo 6, se desarrolla el modelo teórico para calcular el throughput tanto para el enlace ascendente como para el enlace descendente y un ejemplo que va paso a paso hasta llegar al resultado final.

El capítulo 7 es referente a toda la recopilación de datos obtenidos mediando los cálculos realizados y la validación del modelo mediante el uso del software OPNET MODELER.

Finalmente, en el capítulo 8, se muestran las conclusiones obtenidas y una breve perspectiva del futuro de LTE.

CAPÍTULO 2

Conceptos básicos de redes celulares.

2.1 Introducción.

Las comunicaciones móviles llevan implícito el hecho de que se usen dispositivos inalámbricos, por lo menos aquel que el usuario final lleva consigo. Para comprender su funcionamiento es importante entender algunos aspectos básicos y el impacto que dicha forma de comunicación tiene.

En el presente capítulo se abordan los conceptos de capacidad teórica de un canal de radiocomunicaciones dado por el teorema de Shannon, los modos de operación de un sistema, que pueden ser FDD o TDD, la interferencia inter simbólica, las llamadas pérdidas por multitrayectoria, así como la arquitectura de las redes celulares y los protocolos que las componen y la evolución de las comunicaciones móviles.

2.2 Conceptos básicos de comunicaciones móviles.

Comunicaciones móviles: se refieren a cualquier tipo de enlace de radiocomunicación entre dos terminales, de las cuales, al menos una está en movimiento, por lo que se tiene la necesidad de eliminar cables y de fabricar los equipos de tal forma que sean más portátiles y fáciles de transportar.

Capacidad del canal inalámbrico. En sistemas de comunicaciones móviles, el teorema de Shannon nos ofrece una aproximación sobre la capacidad máxima del canal en bps, que se puede obtener en un enlace entre dos nodos y que es afectado por ruido blanco gaussiano (AWGN).

$$C = B \times \log_2 \left(1 + \frac{P}{N} \right) \quad (2.1)$$

$$C = B \times \log_2 \left(1 + \frac{Eb}{No} \times \frac{Rb}{B} \right) \geq Rb \quad (2.2)$$

En las ecuaciones 2.1 y 2.2, “ B ” es el ancho de banda del canal, “ P/N ” es la relación a ruido que se relaciona con la energía de bit “ Eb ” que fluye a una velocidad “ Rb ”. Por otro lado la potencia de ruido “ N ” se relaciona con la densidad espectral de ruido “ No ”. Es evidente que este teorema es para un caso ideal, pues no hay consideraciones de interferencias, distancia entre TX y RX, pérdidas por multitrayecto, entre otras.

Descripción de un sistema celular [2].

- Densidad de usuarios U [usuarios/ Km^2].
- Tráfico promedio de usuario T [bits/usuario].
- Ancho de banda a utilizar por un proveedor de servicios B [Hertz].
- Eficiencia espectral E [bits/s/Hertz].
- Área de cobertura de una estación base S [Km^2].
- Capacidad del operador:

$$\frac{B \times E}{S} = \frac{Hz \times \frac{bits}{s \times Hz}}{Km^2} = \left[\frac{bits}{s \times Km^2} \right] \quad (2.3)$$

El operador puede desplegar un sistema mediante el implemento de una determinada tecnología si puede solventar la demanda de tráfico de los usuarios que existen en un área. Esto es cuando:

$$\frac{B \times E}{S} = U \times T \quad (2.4)$$

$$\left[\frac{\text{bits}}{s \times \text{Km}^2} \right] = \left[\frac{\text{usuarios}}{\text{Km}^2} \right] \times \left[\frac{\text{bits}}{s \times \text{usuario}} \right] = \left[\frac{\text{bits}}{s \times \text{Km}^2} \right] = \left[\frac{\text{bits}}{s \times \text{Km}^2} \right] \quad (2.5)$$

Modos FDD y TDD. Son técnicas de acceso múltiple, para que la estación base pueda distinguir los datos pertenecientes a distintos usuarios.

- **Frequency Divison Duplexing (FDD):** en este modo varios usuarios pueden transmitir y recibir en el mismo instante de tiempo pero usando una diferente frecuencia portadora. Los anchos de banda par los enlaces ascendente y descendente son fijos y del mismo tamaño lo cual es propicio por ejemplo para comunicaciones de voz, donde las tasas de envío y recepción son similares. Cuando se opera en modo FDD, la terminal móvil debe ser capaz de transmitir y recibir al mismo tiempo (full-dúplex), lo que se logra mediante un filtro que separa las frecuencias empleadas para en enlace ascendente de las usadas para en-enlace descendente. De lo contrario se dice que la terminal trabaja en modo half duplex, pues solo es capaz de transmitir o recibir en un instante dado.
- **Time Division Duplexing (TDD):** este modo los usuarios trasmiten y reciben dentro de la misma frecuencia portadora pero en distintos instantes de tiempo. En este caso el sistema es capaz de determinar qué tiempo se usa para el enlace descendente y que tiempo se usa para el enlace ascendente, lo cual es útil para aplicaciones como navegación web, donde la tasa de descarga suele ser más grande que la tasa de carga. Aunque requiere una alta sincronización entre las estaciones base cercanas para evitar la interferencia, es usada comúnmente para redes que tienen distintos puntos de acceso aislados unos de otros.

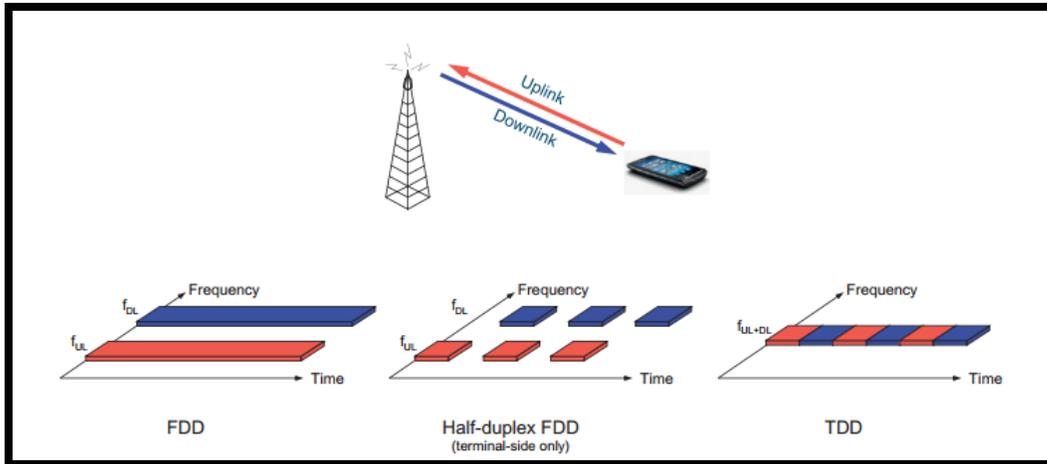


Figura 2.1 Modos FDD y TDD [3].

Desvanecimientos por multitrayectoria. Recordando que la distancia que separa al TX del RX se traduce en pérdidas por propagación ya que la señal se atenúa conforme recorre una determinada distancia, sin mencionar que en el camino la señal sufre cambios en forma de distorsión, interferencia, y cambios de fase entre otras. Por otro lado cuando una señal se propaga por el aire la señal no sigue una única trayectoria si no que debido a los obstáculos se refleja lo que provoca que la señal siga diferentes trayectorias. A este fenómeno se le conoce como multitrayectoria [4].

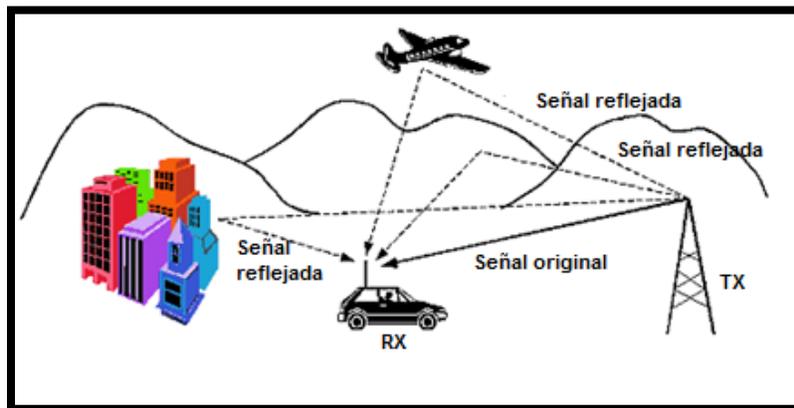


Figura 2.2 Efecto multitrayectoria.

En el receptor, las señales reflejadas llegan instantes después, mientras que la señal original o señal en línea de vista (*Line Of Sight, LOS*) llega en un instante de tiempo que siempre es inferior al de las señales reflejadas. Cuando el receptor hace la suma de estas señales puede darse el caso en el que la amplitud máxima de la señal en línea de vista se

encuentre en contrafase con alguna o varias de las amplitudes de las señales reflejadas lo que resulta en una señal con una amplitud muy pequeña que no puede ser reconocida. A esto se le llama desvanecimientos por multitrayectoria (*Multipath fading*).

Interferencia inter-símbolo. Puesto que las señales reflejadas y la original se reciben en distintos instantes de tiempo, es un hecho que durante la recepción de una señal reflejada que ha recorrido un trayecto más largo, se reciba otra señal que ha recorrido un trayecto más corto, como la señal en línea de vista. Esto provoca que los símbolos modulados que van montados en la señales estén sobrelapados, provocando el fenómeno llamado Interferencia inter simbólica (ISI).

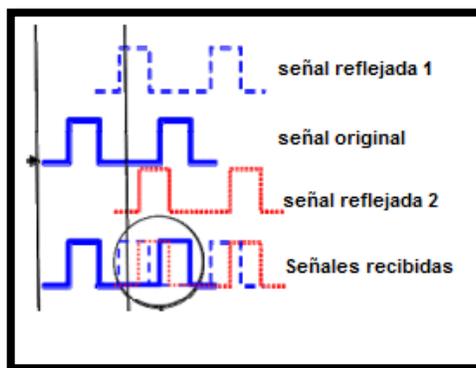


Figura 2.3 Interferencia inter-símbolo.

2.3 Evolución de las comunicaciones móviles.

De forma histórica las comunicaciones móviles tuvieron su primer gran impacto en la década de 1940 durante la segunda guerra mundial a cargo de la empresa Galvin (Hoy Motorola) a través del *Walkie Talkie*, un dispositivo basado en válvulas termoiónicas, completamente inalámbrico, aunque de gran tamaño y que era transportado en una mochila. Posteriormente se mejoró su diseño, reduciendo su tamaño para poder ser transportado en la mano, por lo que se llamó *Handie Talkie*. Hoy en día dichos términos se confunden y convencionalmente al handie talkie se la llama walkie talkie.

Más tarde en la década de 1980, salió a la luz el primer estándar de telefonía móvil para la población civil, desarrollada por los laboratorios Bell llamado AMPS, considerado un estándar de primera generación (1G). El único servicio que se ofrecía era voz, los equipos eran grandes, pesados y caros por lo que las únicas personas que tenían acceso a este servicio eran exclusivamente gente de negocios. En la década siguiente surgen los

estándares de segunda generación 2G, de los cuales los más populares son IS-136 o D-AMPS (*Digital-AMPS*) y GSM. Elaborados por los laboratorios Bell en los Estados Unidos y 3GPP en la Unión Europea respectivamente. Lo más destacable fue la opción del envío de mensajes de texto. En este punto, GSM fue el estándar que más fue adoptado alrededor del mundo ya que IS-136 requería el pago de patentes, mientras que GSM era de uso libre. Debido a este éxito, GSM lanza su extensión llamada GPRS que permite el envío de contenido multimedia (imágenes y videos) por lo que se le considera un estándar 2.5 G.

Posteriormente en los años 2000, la 3GPP lanza el estándar de tercera generación 3G, UMTS que introduce mejoras en las velocidades de los servicios multimedia además del acceso a internet de banda ancha. Otro estándar de 3G es CDMA2000 desarrollado por Qualcomm. También durante los años 2000 surge el estándar 802.11, que aunque no es de telefonía móvil, si es un gran avance en las comunicaciones móviles ya que permitió la interconexión de múltiples equipos a un punto de acceso de forma inalámbrica.

Tabla 2.1 Evolución de la telefonía celular [1].

Características	1G	2G	2.5 G	3G
Tipo de transmisión	Análogica	Digital	Digital	Digital
Servicios	Voz	Voz Datos (Limitado a Fax, y mensajería corta SMS de hasta 160 caracteres alfanuméricos)	Voz Datos Internet (Acceso a correo electrónico, y algunos servicios multimedia)	Voz Datos Internet (Correo electrónico, video y audio en tiempo real, juegos en línea entre otros servicios multimedia)
Velocidad de transmisión de datos	2400 baudios ¹	Baja (9.6Kbps hasta 14.4Kbps)	Alta (De 64Kbps a 144Kbps)	Alta (De 384Kbps a 2Mbps)
Tipo de Conmutación	Circuitos	Circuitos	Híbrida (Circuitos y Paquetes (IP))	Paquetes (IP)
Seguridad en la transmisión	No existe	Alta	Alta	Alta
Calidad de Servicio (QoS)	Baja	Alta	Alta	Alta
Movilidad	Inestable	Estable	Alta 120Km/h (64Kbps) Baja 10Km/h (144Kbps)	Alta 120Km/h (384Kbps) Baja 10km/h (2Mbps)
Tecnologías y Estándares en operación	AMPS	GSM IS-136 (Evolución de AMPS)CDMA PDC	GPRS (Evolución de GSM)	UMTS-WCDMA EDGE (EGPRS, evolución de GSM), DECT

2.4 Sistemas MIMO

MIMO son las siglas de *Multiple Input Multiple Output* (Múltiple Entrada Múltiple Salida) y hacen referencia a una técnica de transmisión y recepción mediante el uso de varias antenas y procesamiento de señales con distinto nivel de complejidad. Reducen los desvanecimientos en frecuencia por la propagación multitrayectoria y mejoran la potencia y calidad de la señal en recepción [5].

Uno de las características importantes de los sistemas MIMO es la separación entre las antenas, misma que está relacionada estrechamente con la frecuencia del canal que se esté empleando para la transmisión/recepción. Para ellos el término $N \times M$ se refiere al número de antenas que se usan para transmisión (N) y para recepción (M), de esta forma, LTE admite elementos (eNodeB, UE, etc.) con configuraciones 2x2 y 4x4 como máximo. Con el uso de los sistemas MIMO se obtienen algunos beneficios como:

- Reduce los efectos ocasionados por los desvanecimientos en frecuencia.
- Permite modificar de forma dinámica la forma del patrón de radiación final formado por un conjunto de antenas con el fin de mejorar la ganancia ya sea en transmisión o recepción o incluso de eliminar de la mejor forma posible la interferencia de otras señales haciendo el patrón de radiación más directivo.
- Mejora las tasas de transmisión de datos al aprovechar de mejor manera el canal inalámbrico, pues al existir múltiples antenas en los transmisores y receptores se crean los llamados canales de transmisión en paralelo que aprovechan de mejor forma el ancho de banda.
- Con el uso de antenas MIMO se extiende la cobertura de la celda.

Desde sus inicios en 2008, LTE fue pensada como una arquitectura de red que soportara el uso de múltiples antenas tanto en la estación base como en los equipos de usuario con el fin de mejorar la experiencia del mismo e incrementar el aprovechamiento del canal e interfaz de radio.

2.5 Redes de banda ancha.

Durante los últimos años del siglo XX las redes de datos comenzaron a tener un crecimiento exponencial debido a la alta demanda de servicios por parte de los usuarios y al incremento mismo de la cantidad de usuarios, lo anterior, aunado al avance tecnológico nos lleva a un presente donde es prácticamente indispensable tener acceso a las redes inalámbricas que proveen servicios de voz, datos, web, etc., mismas que comunican a la personas. Debido a esto, los sistemas deben lograr solventar dichas demandas de tráfico de datos, así entra el concepto de Sistemas o Redes de Banda Ancha.

En la actualidad el servicio de banda ancha es otorgado a través de tecnologías como ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*), telefonía 3G, WiFi, WiMAX y LTE. A excepción de ADSL, las tecnologías mencionadas anteriormente son de tipo inalámbrico y por consiguiente presentan diversas limitantes, entre las que destacan la movilidad y la velocidad de transmisión de datos. El problema de la movilidad se relaciona con la ubicación de los puntos de acceso, el área de cobertura y el efecto que provoca en las señales el hecho de que el nodo destino este en movimiento. Por otro lado el problema de la velocidad de transmisión de datos está vinculado con el aprovechamiento del ancho de banda. Estos problemas son constantemente atacados mediante la investigación de nuevas técnicas de codificación, multiplexación, modulación, etc. Lo anterior aunado a la evolución constante de la electrónica que sencillamente no se ha detenido desde que en los años 1950's apareció la válvula termoiónica o bulbo.

Las redes de banda ancha surgen ante la necesidad de poder dar servicios a más usuarios y a sus demandas de tráfico que cada vez son más altas, por lo que hay que decir que las redes de banda ancha no son el futuro, si no el presente en la forma en que nos comunicamos.

2.6 Arquitectura general de sistemas celulares.

Con el objetivo de lograr una mejor comprensión de los elementos que comprenden la red LTE, a manera de preámbulo, presentaremos en este apartado la estructura general de un red de telefonía celular, posteriormente, en el apartado 2.7 de manera más concreta se presentara la estructura de las redes desarrolladas por la 3GPP para terminar en el apartado 2.8 con la descripción propiamente dicha de las redes LTE.

En la figura 2.4 se presenta la arquitectura básica que poseen las redes de telefonía celular, en la cual destacan tres elementos principales; el equipo de usuario, la red de acceso y la red troncal.

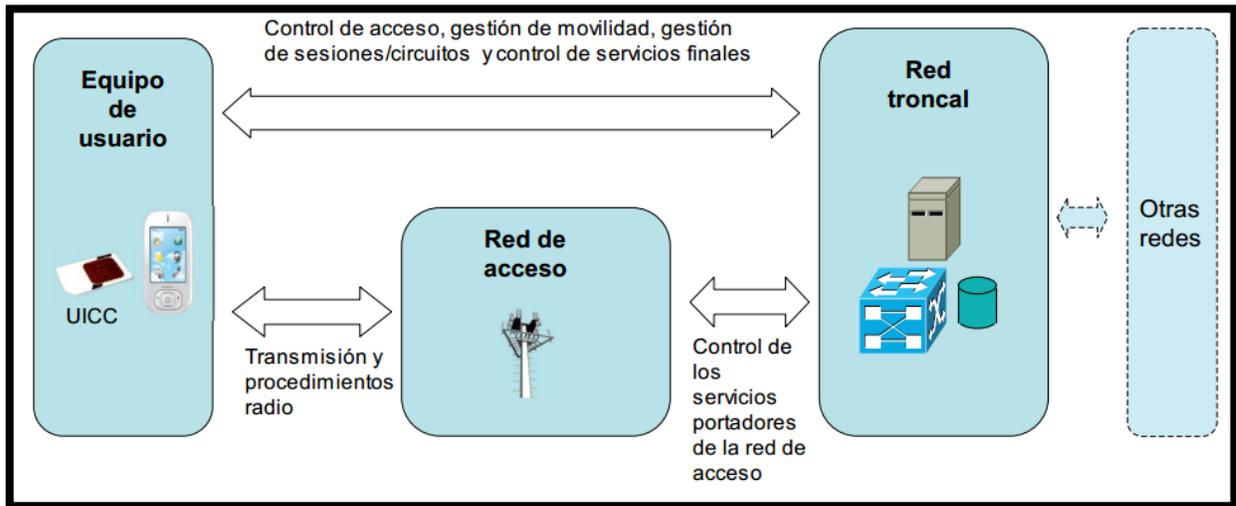


Figura 2.4 Arquitectura general de una red de telefonía celular [2].

Equipo de usuario: dispositivo que permite al usuario acceder a los servicios de la red. Posee una tarjeta UICC (*Universal Integrated Circuit Card*) que es la equivalente en redes UMTS a la tarjeta SIM (*Suscriber Identity Module*) de la redes GSM. Dicha tarjeta contiene la información necesaria para permitir la conexión a la red y la utilización de sus servicios.

Red de Acceso: elemento que se encarga de la conexión entre los equipos de usuario y la red troncal a través de la interfaz de radio. Provee servicios portadores cuya función es otorgar una cierta capacidad de transmisión además de gestionar de manera eficiente los recursos de radio disponibles. De forma general se compone de la estación base y dispositivos de control de la estación base.

Red Troncal: parte del sistema que se encarga de controlar el acceso a los servicios, gestionar la movilidad y las sesiones de datos. Comprende mecanismos para la interconexión con otras redes (por ejemplo internet) e incluso puede tener funciones de control y señalización. Está conformada por equipos que realizan funciones de conmutación de circuitos o paquetes, encaminamiento de tráfico, bases de datos; routers, switches y servidores.

Esta estructura ha sido adoptada por redes de sistemas celulares de segunda y tercera generación y claro, es retomada por la red LTE, debido a que la separación entre la red de acceso y la red troncal flexibiliza la escalabilidad, además de que permite la evolución natural de las redes de banda ancha lo que se traduce en el fácil cambio de equipos y elementos por los más modernos.

2.7 Arquitectura general de redes 3GPP.

La arquitectura planteada por la familia de estándares 3GPP se basa en la arquitectura general presentada en el apartado 2.5. Así pues abarca los tres elementos básicos; el equipo de usuario, la red de acceso y la red troncal. La figura 2.6.1 ilustra la arquitectura de las redes 3GPP.

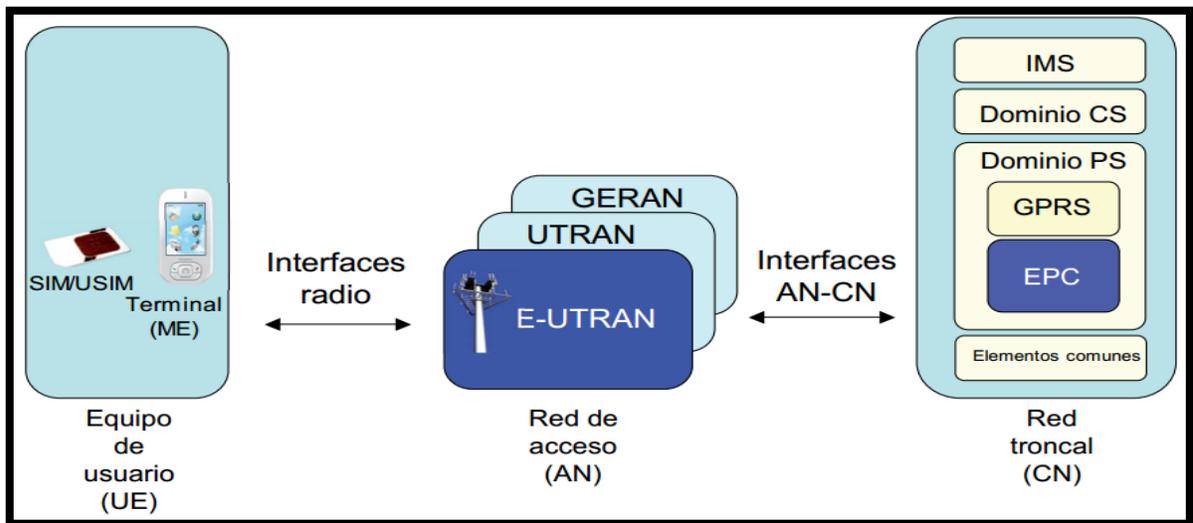


Figura 2.5 Arquitectura de redes 3GPP [2].

Equipo de usuario: en inglés *User Equipment (UE)* se compone propiamente del dispositivo móvil o terminal (*Mobile Equipment*) y una tarjeta UICC, encargada de almacenar a información de la suscripción del usuario a los servicios de la red.

Red de acceso: en inglés *Access Network (AN)* encargada de proporcionar la conexión a los UEs. La 3GPP ha especificado tres tipos de redes de acceso; para los sistemas de segunda generación desarrollo la red de acceso GERAN usada por el sistema GSM; para los sistemas de tercera generación desarrollo la red de acceso UTRAN utilizada por el sistema UMTS y finalmente la red de acceso E-UTRAN usada por el sistema LTE. Cada una de las redes de acceso mencionadas, define su propia interfaz de radio para la conexión de los UEs. Por otro lado la conexión entre la red de acceso y la red troncal se realiza mediante la interfaz AN-CN (*Access Network–Core Network*) especificada de forma particular en cada tipo de red de acceso.

Red troncal: es el elemento que realiza la mayor carga de trabajo. Se divide en un dominio de conmutación de circuitos (*Circuit Switched Domain, Dominio CS*), un dominio de conmutación de paquetes (*Packet Switched Domain, Dominio PS*) y el subsistema de multimedia IP (*IP Multimedia Subsystem, IMS*). A partir de este momento nos referiremos a dichas partes como; dominio CS, dominio PS y subsistema IMS respectivamente

El dominio CS provee servicios basados en la conmutación de circuitos, donde los enlaces son dedicados al momento de establecer la conexión del usuario a través de su UE. Se puede acceder a este dominio desde a través de las redes de acceso GERAN y UTRAN, sin embargo la red E-UTRAN no contempla el dominio CS ya que todos los servicios se proporcionan mediante conmutación de paquetes.

En cuanto al dominio PS, éste provee servicios basados en la conmutación de paquetes, proporciona conectividad a redes de paquetes como la red X.25. Para la red de acceso GERAN, la implementación del dominio PS se realizó mediante la extensión GPRS y que posteriormente adoptó la red de acceso UTRAN y se puede acceder a ella mediante las redes GERAN Y UTRAN. Para la red de acceso E-UTRAN, la implementación del dominio PS se realiza en la entidad denominada como EPC (*Evolved Packet Core*) que es una versión evolucionada de GPRS al cual se puede acceder a través de redes 3GPP (GERAN, UTRAN y E-UTRAN) como de redes ajenas a 3GPP (CDMA2000 y WiMAX).

El subsistema IMS es responsable de realizar la señalización asociada a los servicios multimedia solicitados por un usuario. Es decir el subsistema IMS puede verse como un plano de control encargada de gestionar los servicios solicitados por los usuarios. Gracias a esto, se logra tener bien definidas las partes del transporte de datos propiamente dicha y la parte encargada de gestionar las sesiones de los usuarios.

2.8 Arquitectura de las redes LTE.

Retomando los conceptos presentados en los apartados 2.6 y 2.7 describimos a continuación la arquitectura de una red LTE, enfocándonos principalmente red de acceso y los equipos de usuario, así como las interfaces que intervienen entre ellos.

- El equipo de usuario (UE). Contiene en su interior una tarjeta UICC con información del usuario así como información sobre sus suscripción.
- La red de acceso; que para LTE se denomina red E-UTRAN conformada por la estación base llamada Evolved NodeB (eNB) que otorga conectividad a los UEs y que sirve como enlace entre los diferentes UEs y la red troncal EPC, haciendo uso de los protocolos de la interfaz de radio. Transmite paquetes hacia los UEs mediante los servicios portadores llamados Radio Bearers y lo más importante, se encarga de la gestión de los recursos de radio, así como mecanismos de control de admisión y de handover. El eNB se puede conectar a distintas entidades MME y S-GW, con el fin de dar redundancia lo que se traduce en mayor robustez y eficiencia. Para más detalles ver [6].
- La red troncal: conformada por el EPC que contiene dentro de sí diversas entidades, de las cuales MME (*Mobility Management Entity*), S-GW (*Serving Gateway*) y P-GW (*Packet Data Network Gateway*) son las más importantes. Además proporciona conectividad a la red LTE mediante redes como GERAN, UTRAN, CDMA2000 y WiMAX, así como de proporcionar acceso a los usuarios a redes como internet.

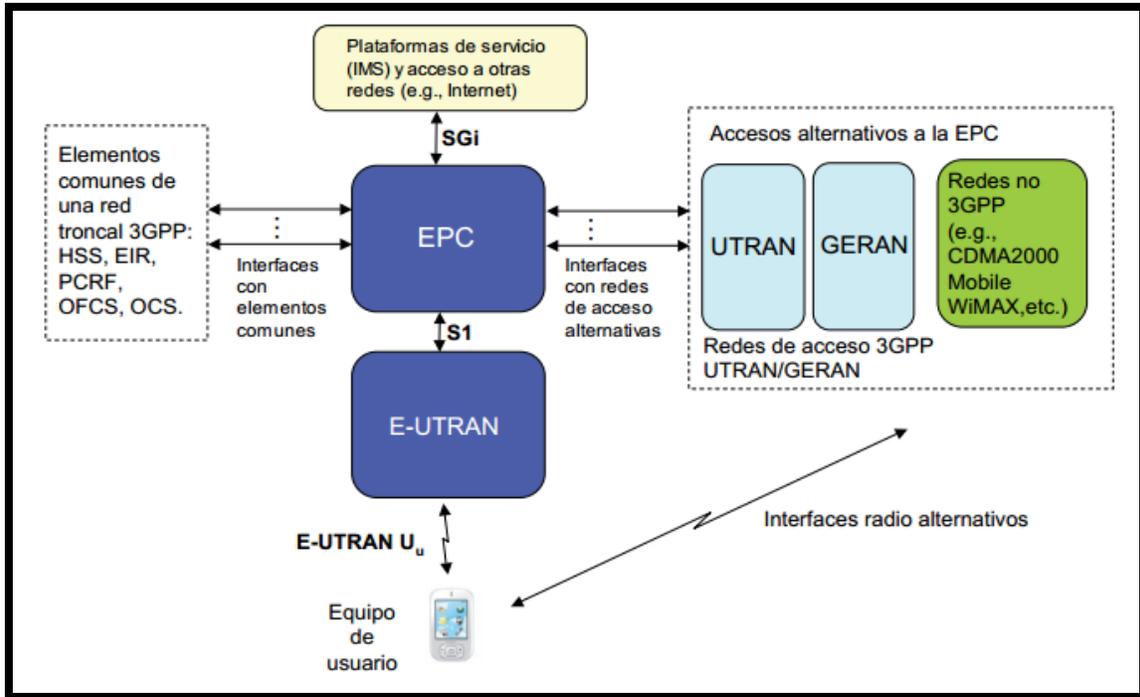


Figura 2.6 Arquitectura de red LTE.

Cabe mencionar que además de los elementos propios de la red LTE, se hace uso de elementos como switches, routers y servidores propios de redes IP y que son necesarios para lograr la asignación de direcciones IP.

A continuación se describen las interfaces que intervienen en las conexiones de los elementos de la red LTE.

Interfaz E-UTRAN Uu: es la interfaz de radio de LTE basada en OFDMA. Permite la transmisión de información por el canal de radio entre el UE y el eNB. Este servicio es llamado Radio Bearer. La interfaz E-UTRAN Uu maneja los siguientes tipos de información:

- Señalización de control: contiene información sobre la cobertura del eNB, la potencia del eNB, la sensibilidad del eNB y establecimiento de una conexión de control entre un UE y el eNB con el fin de tener un registro del UE y la información de usuario asociada.
- Paquetes de IP: el eNB recibe y envía tráfico de IP a los usuarios.

- Señalización dedicada: información que se intercambia entre un UE y el eNB para identificar y dar de alta a un UE, sirve para gestionar los *Radio Bearers*, además de proporcionar la señalización para que un UE acceda al EPC.

Interfaz S1: conecta al eNB con la red troncal EPC. Usa como protocolo de transporte GTP (*GPRS Tunneling Protocol*), realiza un mapeo entre los S1 bearers y los S5/S8 bearers, asociando a cada pareja un túnel bidireccional. Se divide en dos partes [7] [8]:

- Interfaz S1-MME: conecta al eNB con la entidad MME del EPC y es la encargada de las funciones de control y señalización.
- Interfaz S1-U: conecta al eNB con la entidad S-GW del EPC y es usada para el envío de tráfico de usuario entre un UE y el EPC. La interfaz S1-U es gestionada por la interfaz S1-MME.

El servicio de transmisión de información entre el eNB y el EPC se denomina S1-Bearer. Por otro lado a la relación entre un Radio Bearer y un S1 Bearer se le conoce como E-RAB (*E-UTRAN Radio Access Bearer*). Cabe mencionar que el eNB puede conectarse a diversas entidades MME y S-GW lo que se traduce en una mayor robustez de la red al agregar redundancia y disminuye la señalización en caso de haber handovers.

Interfaz SGi: conecta a la entidad P-GW del EPC con las redes externas de IP como internet [9].

Interfaz X2: aunque no aparece en la figura 2.7.1, conecta a dos eNBs entre sí. Realiza funciones de transferencia de datos de usuario, información de control durante procesos de handover, así como transferencia de datos IP almacenados en un eNB hacia un nuevo eNB al que un UE se ha conectado después de un handover [10].

Hemos mencionado que la concatenación de un Radio Bearer y un S1 Bearer forma un E-RAB, pero no son los únicos Bearers que se mencionan en LTE. En la figura 2.7 se aprecian todos los servicios Bearers usados por LTE y los elementos o entidades a los que está asociado cada uno.

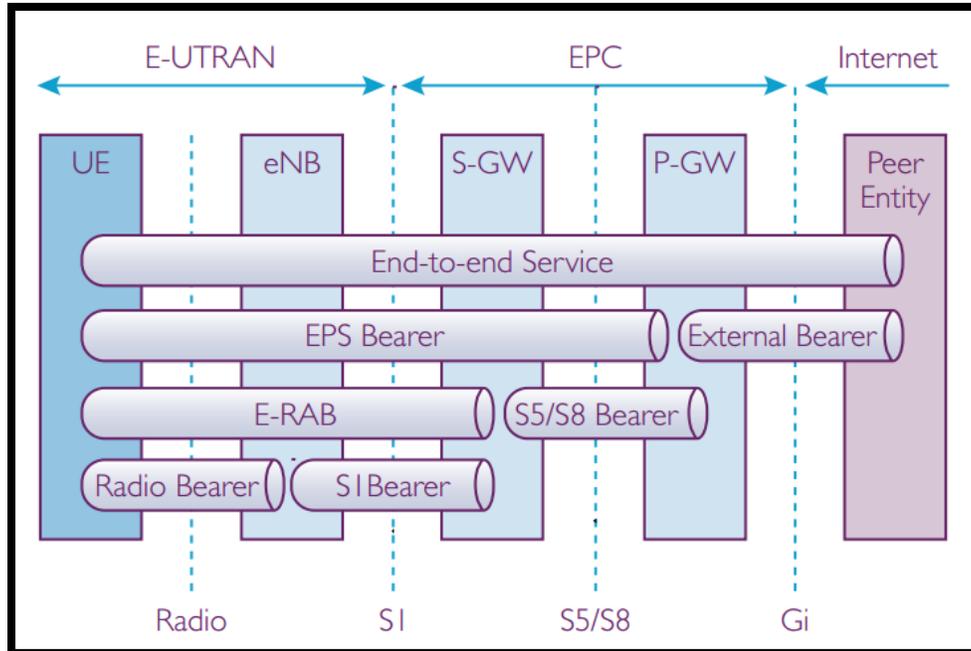


Figura 2.7 Bearers usados por la red LTE [6].

Los EPS bearers pueden ser clasificados en dos categorías. En la primera el EPC establece de forma predeterminada un EPS bearer, llamado Default EPS bearer y se genera cuando se establece una conexión PDN (*Packet Data Network*) y significa que un UE conectado a la red LTE es visible a redes externas como internet mediante una dirección IP, por lo que un UE puede mandar y recibir tráfico de dicha red externa. Se encarga de la transmisión de todo el tráfico IP de un usuario sin distinción alguna, es decir, a través de él se enviara señalización y el tráfico correspondiente a cada aplicación que se esté ejecutando sin hacer distinción alguna y sin aplicar un tratamiento de QoS. Se mantendrán activos mientras dure la conexión PDN. Por otro lado, durante una conexión PDN, el EPC puede activar, desactivar o modificar a los llamados Dedicated EPS bearer, que se encargan de la transmisión de tráfico de usuario haciendo uso de un parámetro llamado TFT (*Traffic Flow Template*) que es una etiqueta que se aplica a un determinado flujo de tráfico al que se desea aplicar un tratamiento específico de QoS, por ejemplo flujo de tráfico de una video llamada.

La segunda categoría se basa en el empleo de una tasa de bits garantizada, así tenemos a los GBR (*Guaranteed Bit Rate*) bearers, que se asocian a una tasa de bits garantizada, que es una tasa de datos promedio a largo plazo que el UE puede esperar tener. Son apropiados para servicios en tiempo real como llamadas de voz. Por otro lado se tienen

los Non GBR bearer, o bearer de tasa no garantizada, que como su nombre lo indica no asegura una tasa de datos por lo que varía de un momento a otro durante la conexión. Los Non GBR bearers son apropiados para aplicaciones navegación web.

2.9 Protocolos y estándares de la tecnología LTE.

Los protocolos de la red LTE se dividen en dos grandes categorías; Plano de usuario y Plano de control. La torre de protocolos del plano de usuario de la red LTE contienen mecanismos para el envío correcto de datos entre un UE y la entidad P-GW dentro del EPC. En la imagen 2.8.1 se observan los protocolos implicados en cada uno de los elementos e interfaces que componen la red LTE.

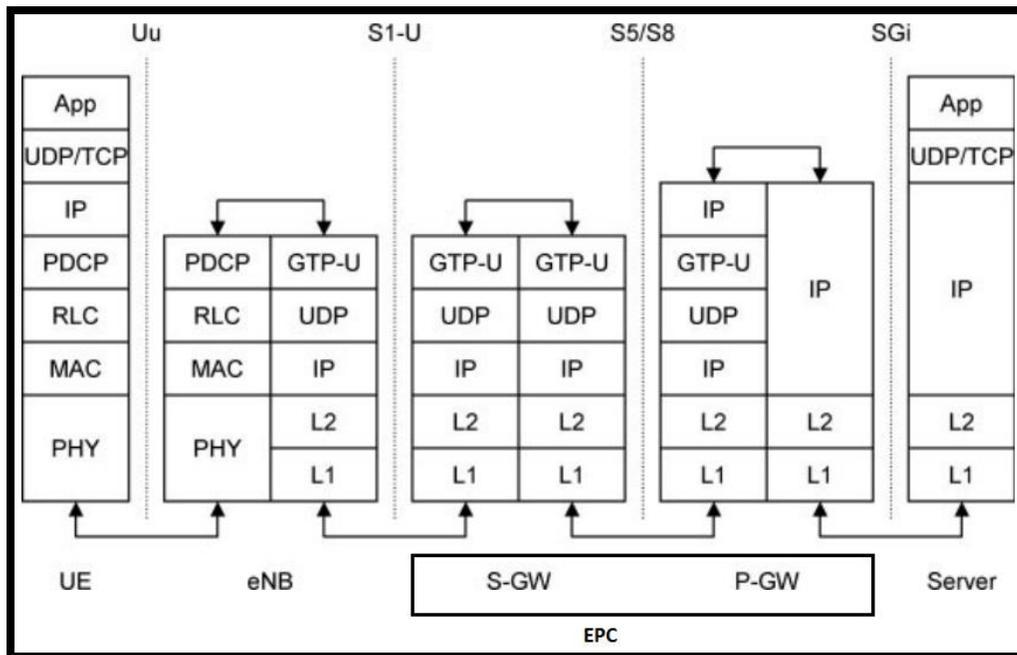


Figura 2.8. Torre de protocolos del plano de usuario [11].

En la parte superior de la imagen se indican las interfaces que intervienen entre los distintos elementos mismos que se indican en la parte inferior.

Capa de aplicación: indicada en la figura 2.8. como *app*, es la capa que está en contacto directo con el usuario y precisamente indica la aplicación o conjunto de aplicaciones que el usuario está ejecutando y por las cuales demanda una conexión a la red LTE.

Capa de transporte: para el caso de LTE, el transporte de los datos se realiza mediante los protocolos UDP, TCP dependiendo del tipo de aplicación del que se trate. Y para la señalización emplea el protocolo SCTP que está basado en TCP.

Capa IP: puesto que la red LTE se basa en conmutación de paquetes forzosamente requiere de un protocolo como IP para encaminar el tráfico destinado a un usuario en particular, empleando la dirección IP como criterio de enrutado. LTE soporta IPv4 e IPv6.

Capa de enlace: referida en el modelo OSI como capa 2, se desdobra en 3 subcapas; la capa PDCP, la capa RLC y la capa MAC. Mismas que se abordan en el capítulo 4.

Capa física: maneja codificación/decodificación así como modulación/demodulación y técnicas de mapeo de multi-antena en caso de que se implemente. Ofrece servicios a la capa MAC en forma de canales de transporte y entre elementos de la red en forma de canales físicos.

Capa GTP-U: significa *GPRS Tunneling Protocol-User plane*, y es un protocolo de encapsulado para el envío de paquetes IP de usuario y básicamente se encarga de multiplexar los paquetes IP de distintos usuarios asignando a cada uno un identificador de túnel que está asociado a un EPS bearer. El indicador se denomina TEID (*Tunnel End point Identifier*). [12].

Refiriéndonos al plano de control y señalización de la red LTE el conjunto de protocolos que se emplean se aprecian en la figura 2.8.2.

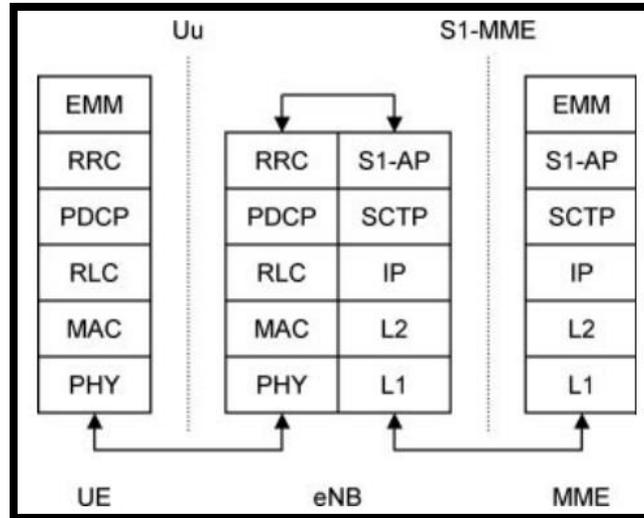


Figura 2.9 Torre de protocolos del plano de control [11]

En la parte superior de la imagen se indican las interfaces que se ven involucradas en el plano de control, mientras que en la parte inferior se hace referencia a los elementos que interactúan dentro del mismo plano de control de la red LTE, de esta forma vemos que los elementos involucrados son el UE, la estación base (eNB) y la entidad MME que se encuentra dentro del EPC.

Protocolo EMM: realiza procedimientos referentes a la movilidad y registro a la red E-UTRAN. Los mecanismos de registro y registro que en las especificaciones se denominan *Network Attach* y *Network Detach* respectivamente, así como la actualización del área de seguimiento (*Tracking Area Update*). En otras palabras el protocolo EMM se encarga de la autenticación de los UE que desean acceder a la red E-UTRAN.

Protocolo RRC: del inglés *Radio Resource Control*, es el protocolo encargado de realizar una conexión de control entre el UE y el eNB, con el fin de que el UE pueda tener acceso al uso de los radio bearers e incluso pueda modificarlos. Por otro lado la conexión realizada por el protocolo RRC también sirve para que el UE y el EPC puedan intercambiar mensajes de señalización y con eso el UE pueda hacer uso de los servicios proporcionados por el EPC, como son el establecimiento de una conexión con una red externa como internet.

Cuando un UE logra tener una conexión RRC se dice que está en modo activo o conectado, pues pueda ya hacer uso de los radio bearers y de los recursos de la red. Por el contrario cuando un UE no tiene establecida una conexión RRC se dice que está en modo idle y únicamente es capaz de “escuchar” la información difundida por la red.

Protocolo S1-AP; *S1-Application Part*, es el encargado de sustentar las funciones descritas en el apartado 2.7 de la interfaz S1.

Protocolo SCTP: *Stream Control Transmission Protocol*, es un protocolo de transporte usado en el plano de control para la entrega de mensajes de señalización. Está basado en TCP, aunque incluye mejoras para hacerlo más robusto. La más destacada es que incorpora una característica denominada asociación, que es un control de flujo y congestión que permite que los nodos involucrados en una conexión tengan múltiples caminos para la entrega de información y además los flujos de información pueden transmitirse en paralelo [13].

2.10 Estado actual de las redes LTE.

Desde su aparición en 2008, LTE es una tecnología que ha sido adoptada de forma rápida principalmente en Europa, lugar donde iniciaron los servicios otorgados por dicha red y en un lapso de casi 5 años la implementación de esta tecnología ha sido adoptada alrededor del mundo, llegando a lugares como Rusia e incluso varios países de África. De hecho en Europa es donde se ha tenido el mayor desarrollo en este rubro, pues debido a ser prácticamente el primer continente en usar LTE ha sido el que más lejos ha llegado, pues han logrado velocidades de transmisión de alrededor de 300 Mbps en el enlace descendente y de 150 Mbps para el enlace ascendente mediante el empleo de equipos MIMO 4X4.

Actualmente la 3GPP está trabajando en LTE-Advanced que estrictamente hablando sería la verdadera red 4G, ya que por especificaciones dadas por la UIT, LTE no cumple con las características para ser 4G. Algunas de estas características son; velocidades de hasta 1 Gbps con tiempos de respuesta de máximo 1 ms. Estos son los aspectos fundamentales en los que se centra el trabajo de la 3GPP para LTE-Advanced.

Particularmente en México la implantación de LTE corrió a cargo de la empresa TELCEL, el día 12 d Noviembre del año 2012. De acuerdo a información aportada por la empresa en su página web alcanza tasas de hasta 20 Mbps. De inicio solo eran alrededor de 8 equipos los que tenían el hardware necesario para tener acceso a LTE, con el paso de los meses y la incorporación de las otras empresas telefónicas del país, han sido más los equipos y los planes que ofrecen conectividad LTE en el país.

CAPÍTULO 3

Capa física de LTE.

3.1 Introducción.

La capa física es la encargada de las funciones relacionadas con la transmisión y recepción de la información generada en las capas superiores. Por ello, es fundamental comprender los procesos más sobresalientes que se llevan a cabo en dicha capa.

En este capítulo se presentan los conceptos de la modulación y codificación, el tipo de interfaz de radio empleada por LTE (OFDM), la unidad de información mínima empleada en LTE, las estructuras de las tramas y mapeo de los canales entre las distintas capas superiores y su relación con la capa física.

3.2 Modulación y codificación en LTE.

Los esquemas de modulación utilizados en LTE son QPSK, 16 QAM y 64QAM, mismos que manejan un número de estados o combinaciones determinados para acomodar los símbolos OFDM en base a la siguiente expresión:

$$N = 2^m \quad (3.1)$$

Donde el “2” indica el sistema binario, el superíndice “m” indica el número de bits usados para modular cada símbolo y la letra “N” denota la cantidad de estados posibles. En nuestro caso, el valor de N es 4, 16 o 64 dependiendo si se trata de QPSK, 16QAM o 64 respectivamente. Lo anterior puede apreciarse de forma más clara al ver la cantidad de estados como una constelación de puntos disponibles para acomodar los símbolos OFDM. Véase figura 3.1

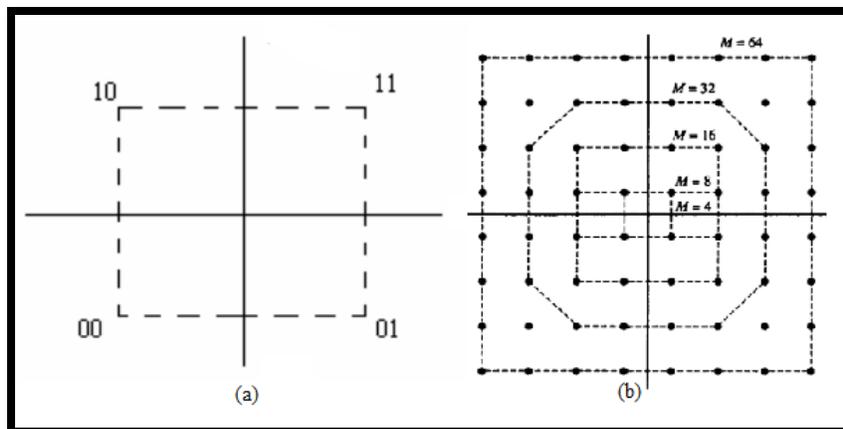


Figura 3.1 Constelaciones de las modulaciones (a) QPSK y (b) QAM.

El uso de modulaciones de alto orden como 64-QAM permite hacer un uso más eficiente del ancho de banda, es decir, es posible transmitir más información en un determinado ancho de banda. Sin embargo ello implica una disminución de la robustez del sistema al ruido e interferencia. En otras palabras las modulaciones 16QAM y 64QAM requieren en el receptor una SNR más alta en comparación con QPSK ya que son más susceptibles a interferencia y errores [14].

En sistema LTE hace uso de modulación y codificación adaptativa, lo que quiere decir que si la SNR es lo suficientemente alta es posible hacer uso de una modulación de alto orden, por ejemplo 64-QAM, en el caso en el que el SNR sea bajo, se utilizan esquemas de modulación de bajo orden como QPSK. Particularmente, para el enlace descendente, LTE emplea un parámetro llamado CQI (*Quality Channel Indicator*) para medir la calidad del canal y establecer una modulación y codificación a un UE. Aunque cabe resaltar que dicho parámetro también depende de la calidad del equipo de cada usuario. La tabla 3.1 muestra una lista de algunos de los índices de CQI utilizados en LTE.

Tabla 3.1 Índices de CQI [15].

CQI index	Modulation	Approximate code rate	Efficiency (information bits per symbol)
0	No transmission	—	—
1	QPSK	0.076	0.1523
2	QPSK	0.12	0.2344
3	QPSK	0.19	0.3770
4	QPSK	0.3	0.6016
5	QPSK	0.44	0.8770
6	QPSK	0.59	1.1758
7	16QAM	0.37	1.4766
8	16QAM	0.48	1.9141
9	16QAM	0.6	2.4063
10	64QAM	0.45	2.7305
11	64QAM	0.55	3.3223
12	64QAM	0.65	3.9023
13	64QAM	0.75	4.5234
14	64QAM	0.85	5.1152
15	64QAM	0.93	5.5547

Para la parte de codificación LTE implementa los modos de ARQ (*Automatic Repeat Request*) y FEC (*Forward Error Correction*) mediante un código de bloque o convolucional. A esto se le suma el uso de turbo códigos que hacen posible la codificación a tasas más altas. Por otro lado, LTE maneja algunos símbolos para mecanismos de control en el PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*), (ver apartado 3.5), dependiendo si se hace uso de un prefijo cíclico normal o extendido, dicha cantidad de símbolos varía entre 1 y 4 y tiene un impacto directo en la codificación utilizada por un UE.

Tabla 3.2 Tasas de codificación para LTE [16].

Code rate with different number of OFDM symbols					
MCS index (I_{MCS})	Modulation	Available number of OFDM			
		13	12	11	10
0	QPSK	0.10	0.11	0.12	0.13
1	QPSK	0.13	0.14	0.16	0.17
2	QPSK	0.16	0.17	0.19	0.21
3	QPSK	0.21	0.22	0.25	0.27
4	QPSK	0.25	0.28	0.30	0.33
5	QPSK	0.31	0.34	0.37	0.41
6	QPSK	0.37	0.40	0.44	0.48
7	QPSK	0.44	0.47	0.52	0.57
8	QPSK	0.50	0.54	0.59	0.65
9	QPSK	0.56	0.61	0.67	0.73
10	16QAM	0.28	0.30	0.33	0.37
11	16QAM	0.33	0.34	0.37	0.41
12	16QAM	0.36	0.39	0.43	0.47
13	16QAM	0.40	0.44	0.48	0.53
14	16QAM	0.46	0.50	0.54	0.59
15	16QAM	0.51	0.55	0.60	0.66
16	16QAM	0.54	0.59	0.64	0.71
17	64QAM	0.36	0.39	0.43	0.47
18	64QAM	0.39	0.42	0.46	0.50
19	64QAM	0.43	0.46	0.51	0.56
20	64QAM	0.47	0.51	0.55	0.61
21	64QAM	0.51	0.55	0.60	0.66
22	64QAM	0.55	0.60	0.65	0.72
23	64QAM	0.59	0.64	0.70	0.77
24	64QAM	0.64	0.69	0.75	0.83
25	64QAM	0.68	0.74	0.80	0.88
26	64QAM	0.72	0.78	0.85	0.93
27	64QAM	0.75	0.81	0.89	0.97
28	64QAM	0.88	0.93	0.99	1.06

3.3 Transmisión OFDM.

Dado que en entornos urbanos es común que existan múltiples trayectorias que influyan en la interferencia inter simbólica (ISI), es de vital importancia que la interfaz de radio pueda disminuir al mínimo este problema. OFDM ha sido la opción elegida para atacar este problema, además de que ya ha sido implementado en sistemas como WLAN y WiMAX. Este tipo de transmisión divide el espectro en varias subportadoras, cada una de las cuales lleva una parte del flujo de datos que se pretende enviar [11].

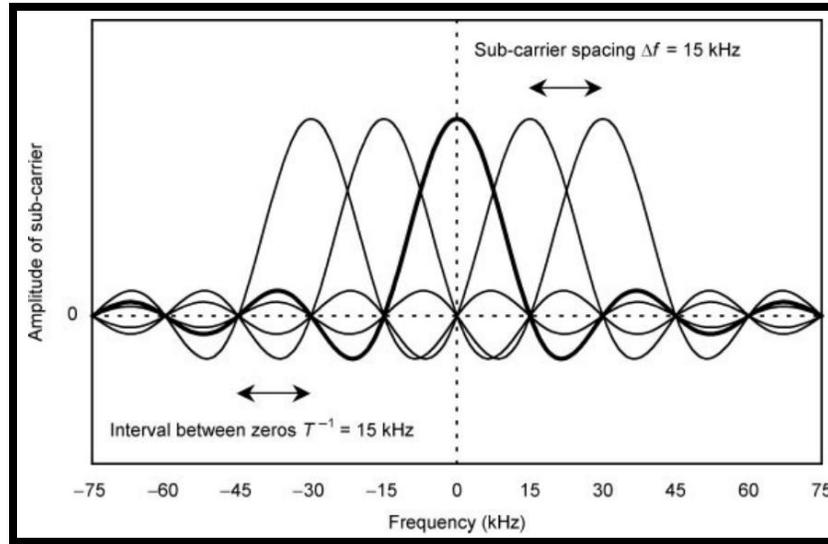


Figura 3.2 Espectro de señales OFDM

LTE usa un espaciado fijo entre subportadoras de 15 KHz y son agrupadas en conjuntos de 12 subportadoras. Esto se lleva a la versión múltiple para dar lugar al método de acceso al medio que emplea LTE llamada OFDMA ya que todos los UEs comparten los recursos y les son asignados de forma dinámica. El eNB transmite hacia los UEs en diferentes tiempos y frecuencias de antemano conociendo las necesidades de cada aplicación que solicitan los recursos.

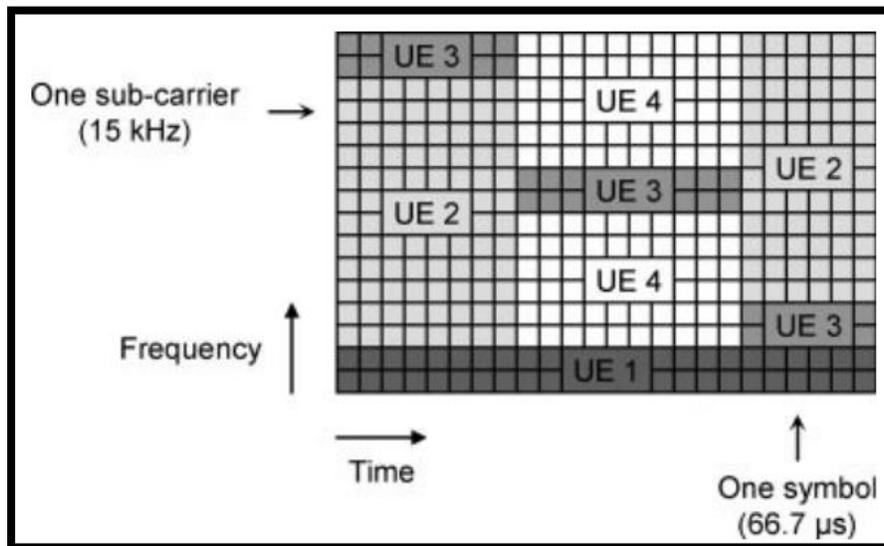


Figura 3.3 Método de acceso OFDMA [11].

En la figura 3.3 se aprecian los recursos asignados a las aplicaciones que cada UE solicita. Por ejemplo el UE 1 está recibiendo un flujo de datos de VoIP por lo que se le asignan pocas subportadoras pero constantes. Por otro lado el UE 2 está ejecutando una aplicación de FTP por lo que la cantidad de subportadoras es grande lo que le provee una alta tasa de transmisión pero esta asignación puede variar en el tiempo.

La desventaja de OFDM es que la potencia de las señales transmitidas está sujeta a variaciones lo que acarrea problemas en el transmisor. Puesto que los transmisores del eNB (enlace descendente) son diseñados de forma que sean capaces de soportar esta cuestión, OFDM funciona bien para el enlace descendente, cosa que no puede ocurrir en el enlace ascendente ya que los UEs deben ser más sencillos y baratos. Esta variación de potencia se debe a que hay una relación uno a uno entre los símbolos y las subportadoras.

Para eliminar este problema los símbolos de cada UE se envían de forma contigua usando también un conjunto de subportadoras que están una después de otra lo que implica una reducción importante de la variación de potencia. Este método es conocido como SC-OFDMA (*Single Carrier OFDMA*)

3.4 Concepto de bloque de recursos.

Se entiende por bloque de recursos físico, (PRB), al mínimo elemento de información que puede ser asignado por el eNB a un usuario. Un PBR ocupa 180 KHz equivalente a 12 subportadoras de 15 KHz, y en él se transmiten 6 o 7 símbolos OFDMA, dependiendo de la longitud del prefijo cíclico utilizado. La duración de un PRB es igual a 5 ms equivalente a la duración de un slot.

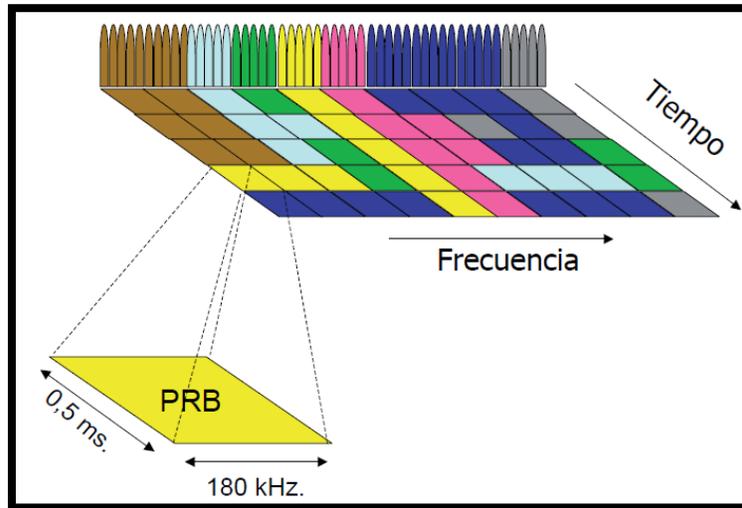


Figura 3.4 Bloque de recursos físicos (PRB).

El número de bloques de recursos físicos disponibles depende del ancho de banda del canal en que se esté trabajando.

Tabla 3.3 Relación entre ancho de banda del canal y número de PRBs [17].

System bandwidth [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
System bandwidth [PRBs]	6	15	25	50	75	100

Hablando de las terminales de los usuarios, estas poseen distintas características de acuerdo a la marca y al precio. Esto permite una amplia gama de posibilidades para cada usuario ya no solo depende del tipo de suscripción que tenga con su proveedor de servicios, sino también del equipo que este adquiera. Esto se ve reflejado en las categorías en las que LTE clasifica a cada terminal de acuerdo a sus capacidades físicas. Se han especificado un total de 5 categorías, donde la 1 es la más limitada y la categoría 5 es la más completa. Consecuentemente se definieron 3 categorías más, de acuerdo a esto, la tabla 3.4 muestra las categorías y sus características.

Tabla 3.4 Categorías de equipos de usuario [3].

	Category							
	Release 8/9/10					Release 10 only		
	1	2	3	4	5	6	7	8
Downlink peak rate (Mbit/s)	10	50	100	150	300	300	300	3000
Uplink peak rate (Mbit/s)	5	25	50	50	75	50	150	1500
Maximum downlink modulation	64QAM							
Maximum uplink modulation	16QAM				64QAM	16QAM	64QAM	
Max. number of layers for downlink spatial multiplexing	1	2		4		Signaled separately		

3.5 Estructura de trama.

En el dominio del tiempo, los recursos físicos del sistema LTE se estructuran siguiendo dos posibles estructuras de tramas ya que LTE es capaz de trabajar en modo FDD o en TDD.

- **Estructura de trama tipo 1.**

Esta estructura es válida para sistemas que operan en FDD y es usada tanto para el enlace ascendente como para el enlace descendente. En esta estructura el eje del tiempo se divide en tramas de 10 ms. Cada trama a su vez está compuesta por 20 ranuras temporales o slots, de duración 0.5 ms.

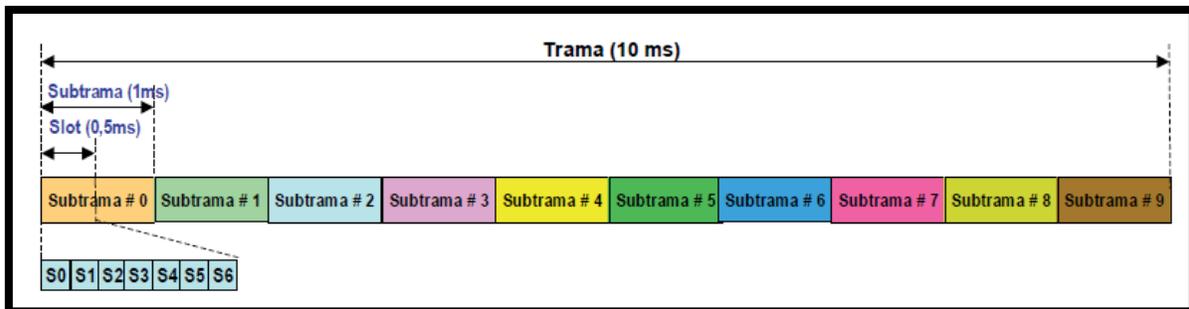


Figura 3.5 Estructura de trama tipo 1 [2].

- **Estructura de trama tipo 2**

Diseñada para modo TDD, el eje del tiempo se divide en tramas de 10 ms y cada trama se compone de 10 subtramas de duración 1ms. En este caso hay subtramas dedicadas al enlace ascendente y descendente. En suma hay subtramas especiales que indican en qué modo se opera en un instante dado y que sirven para fines de sincronización.

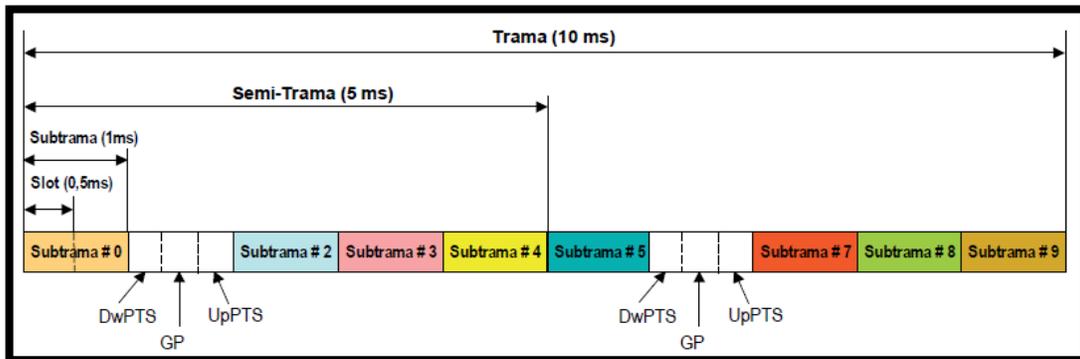


Figura 3.6 Estructura de trama tipo 2 [2].

El número de subtramas dedicadas al enlace descendente y ascendente varía de acuerdo al índice TDD empleado. A su vez las subtramas especiales que tienen tres campos; DwPTS, GP y UpPTS, mimos que tienen una duración variable en símbolos. Cabe resaltar que si la duración de dichos campos es menor o igual 3 símbolos, los campos no se emplean para la transmisión de datos, pues su duración es demasiado corta.

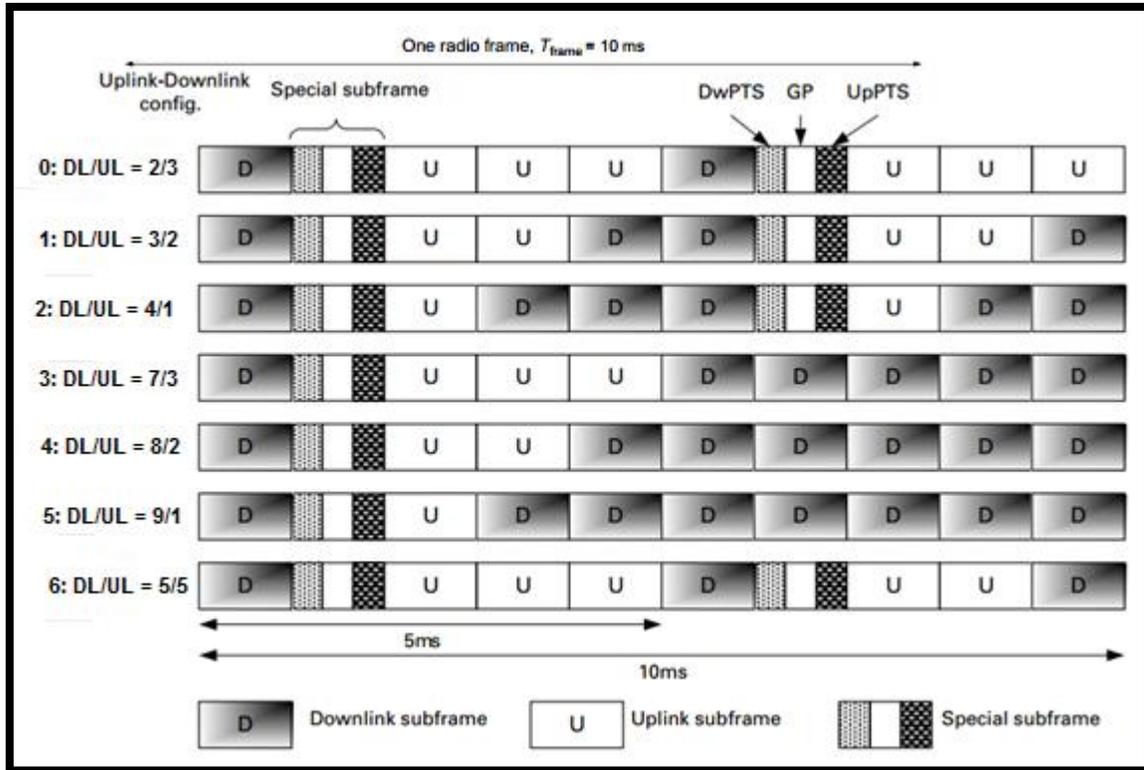


Figura 3.7 Índice TDD [18].

La subtrama especial puede tener asignadas hasta dos subtramas y su papel está ligado directamente a que tan rápido el sistema conmuta entre una transmisión de enlace descendente y ascendente. Los tres campos que contiene la subtrama especial son:

- DwPTS: Downlink Pilot Signal, se usa para indicar que se opera en modo DL e incluso si tiene una duración grande, puede ser usado para información de usuario.
- UpPTS: Uplink Pilot Signal, al igual que la DwPTS, se usa para indicar que se opera en modo UL, pero puesto que su duración máxima es de 2 símbolos, no es apta para el envío de información de datos de usuario.
- GP: Guard Period, este campo el tiempo en que el sistema cambia de modo de UL a DL y viceversa, se recomienda que sea de una duración lo suficientemente larga para que todos los elementos de la red conmuten su modo de operación.

La tabla 3.5 muestra las posibles configuraciones de la subtrama especial y la duración en símbolos de cada campo.

.Tabla 3.5 Configuración de la subtrama especial.

Special subframe configuration	Extended cyclic prefix length in OFDM symbols			Normal cyclic prefix length in OFDM symbols		
	DwPTS	GP	UpPTS	DwPTS	GP	UpPTS
0	3	8	1	3	10	1
1	8	3		9	4	
2	9	2		10	3	
3	10	1		11	2	
4	3	7	2	12	1	2
5	8	2		3	9	
6	9	1		9	3	
7	-	-	-	10	2	
8	-	-	-	11	1	

3.6 Descripción de los enlaces ascendente y descendente.

Enlace descendente

Para facilitar la implementación de los mecanismos físicos necesarios para realizar la demodulación de las señales OFDMA propias del enlace descendente, se han establecido un conjunto de señales de referencia y sincronización además de un conjunto de canales de tráfico y control que se describirán en esta sección.

- **Señales de Referencia (RS).**

Las señales de referencia o símbolos piloto se utilizan para:

- Obtener medidas de calidad en el enlace descendente.
- Implementar mecanismos de búsqueda de celda y sincronización inicial.
- Se sitúan en los PRBs en dos grupos: las primarias y las secundarias.

- **Señal de Sincronización (SCH).**

La señal de sincronización (SCH) se utiliza para facilitar los procesos de sincronización temporal del sistema. Se divide en dos:

- P-SCH (*Primary SCH*) que permite la sincronización temporal a nivel de subtrama, mediante procedimientos de correlación entre la señal recibida y una secuencia de referencia almacenada en el receptor.
- S-SCH (*Secondary SCH*) que posibilita la sincronización temporal a nivel de trama, utilizando la misma metodología de correlación temporal.

- **Canales físicos de tráfico.**

- **Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)**

El canal PDSCH transmite habitualmente información de usuario. Contiene la información entregada por la subcapa MAC mediante el canal de transporte *Downlink Shared Channel* (DL-SCH). Los posibles esquemas de modulación considerados son: QPSK, 16QAM y 64 QAM.

- **Physical Multicast Channel (PMCH)**

El PMCH se utiliza para transportar información MBMS (*Multimedia Broadcast and Multicast System*) empleado cuando se ejecutan servicios de multicast.

- **Canales físicos de control.**

- **Physical Broadcast Channel (PBCH).**

Transporta información básica sobre el sistema como el ancho de banda del canal, el tipo de duplexaje empleado, número de identificación de trama, etc.

- **Physical Downlink Control Channel (PDCCH).**

En él se acarrea un parámetro denominado DCI (*Down Control Indicator*) que lleva información sobre la asignación de recursos y mecanismos de retransmisión HARQ.

➤ **Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH).**

Informa al terminal móvil sobre el número de símbolos (1-4) utilizados para transmitir el canal PDCCH a través del parámetro llamado CFI (*Channel Format Indicator*). Se transmite en cada subtrama, siempre en el primer símbolo.

➤ **Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH).**

En él va información sobre reconocimiento ACK/NACK para el mecanismo HARQ, cada uno de estos canales puede llevar información de este tipo de hasta 8 usuarios¹.

Enlace ascendente

Ahora se describirán las características más importantes de los canales físicos especificados para el enlace ascendente en los sistemas.

• **Physical Uplink Shared Channel (PUSCH)**

Es el canal utilizado para enviar la información de usuario. Se transmite utilizando señales SC-FDMA. El número de subportadoras utilizado lo determina el gestor de recursos radio (*scheduler*) dicha asignación es enviada al UE mediante el PDCCH.

• **Canales de control.**

➤ **Physical Uplink Control Channel (PUCCH).**

Entre la información que transporta se destaca; las peticiones de recursos, reconocimiento ACK/NACK de enlace ascendente, información sobre el CQI. Está ubicado en los extremos de la banda del sistema.

➤ **Physical Random Access Channel (PRACH).**

El canal físico de acceso aleatorio consta de un prefijo cíclico y un preámbulo, y de esta manera iniciar, por parte del móvil, el procedimiento de conexión al sistema.

¹ Si desea ahondar en estos aspectos se recomiendan [5], [11] y [18]

Señales de Referencia (SR) en el enlace ascendente

De modo análogo a lo que ocurre en el enlace descendente, también se definen dos tipos de señales de referencia para el enlace ascendente:

- Señales DM-RS: empeladas para la detección y demodulación en el enlace ascendente, se ubican en la zona destinada el PUSCH.
- Señales SRS: usadas para conocer el comportamiento del canal en el dominio de la frecuencia y facilitar los algoritmos de gestión de recursos.²

² Para más información de las señales de referencia y canales de control en el UpLink ver [17] y [26]

CAPÍTULO 4

Capa de enlace de LTE.

4.1 Introducción.

En la capa de enlace de LTE se realizan las funciones de scheduling o calendarización para los usuarios. En otras palabras, la capa de enlace lleva a cabo los procesos necesarios para que el eNodeB asigne de la mejor forma los recursos (en el dominio tiempo-frecuencia) de los que dispone a los usuarios que lo solicitan. Esta asignación se lleva a cabo dependiendo de diversos factores, como la aplicación que se desea ejecutar, el tipo de enlace al que tiene derecho un determinado usuario, entre muchas otras.

A lo largo de este capítulo se presentan los conceptos referentes la capa de enlace de LTE, tanto desde el punto de vista del usuario, como desde el punto de vista del eNodeB, la forma en la que se divide dicha capa, así como las funciones y protocolos relacionados a cada una de las subcapas.

Por otro lado se verán los criterios más importantes en los que se basa el eNodeB para realizar de la mejor forma la asignación de recursos a los equipos de los usuarios.

4.2 División de la capa de enlace.

Subcapa PDCP: *Packet Data Convergence Protocol*, es la primera subcapa que procesa los paquetes de IP provenientes del usuario y los mensajes emitidos por el protocolo RRC. Sus funciones principales son las siguientes [21]:

- Emplea el protocolo ROHC (*Robust Header Compression*) para comprimir y descomprimir los encabezados de los paquetes IP. Así de los 40 bytes que tiene un paquete típico de IP, PDCP lo reduce a un tamaño que va de 2 a 3 bytes [19].
- Lleva a cabo el cifrado de información mediante una clave de 128 bits.
- Realiza funciones de reordenación y detección de paquetes duplicados provenientes de la subcapa RLC.

Subcapa RLC; *Radio Link Control*, en general es responsable de la segmentación de los paquetes IP provenientes de la subcapa PDCP. De igual forma se encarga de las peticiones de retransmisión en caso de que se reciban paquetes con errores, así como de la eliminación de paquetes duplicados y asegura la entrega secuencial de los paquetes a las capas superiores. Puede ser configurado en tres modos; *Acknowledged Mode (AM)*, *Unacknowledged Mode (UM)* y *Transparent Mode (TM)*. La configuración de dicho modo depende tipo de aplicación que se esté ejecutando [22].

- **Acknowledged Mode:** usado para solicitar retransmisión de paquetes perdidos mediante el mecanismo ARQ (*Automatic Repeat Request*) aplicado a los canales lógicos y que es el modo más robusto. Usado para aplicaciones que requieran fidelidad de entrega como navegación web y e-mail.
- **Unacknowledged Mode:** empleado para aplicaciones que son muy sensible al retardo como VoIP y video llamadas ya que solo detecta errores pero no los corrige.
- **Transparent Mode:** modo más sencillo de operación de la subcapa RLC ya que envía la información tal cual es recibida de modo que no agrega ningún dato en su encabezado referente a segmentación, secuencia, detección o corrección de errores. Es usada para la difusión de información de aviso en la red.

La subcapa RLC recibe servicio de la subcapa MAC mediante los llamados canales lógicos, que dependiendo del tipo de datos que manejen serán; canales lógicos de control o canales lógicos de tráfico.

- **Canales lógicos de control.**
 - **Broadcast Control Channel (BCCH).**

Es un canal de enlace descendente usado para la difusión de información del sistema desde la red hacia todos los UE en una célula, con el objetivo de que cada UE conozca las características básicas de eNB.

- **Paging Control Channel (PCCH):**

Canal de enlace descendente usado para notificar a los UE de una llamada entrante o de algún cambio en el eNB.

- **Common Control Channel (CCCH):**

Empleado tanto por el enlace descendente como ascendente que proporciona información de control durante el establecimiento de una conexión entre un UE y un eNB.

- **Multicast Control Channel (MCCH):**

Canal de enlace descendente empleado para la transmisión de información de control desde el eNB hacia un determinado grupo de UEs que están ejecutando servicios MBMS.

- **Dedicated Control Channel (DCCH):**

Usado tanto en el enlace descendente como en el ascendente, se emplea para la transmisión de control dedicada entre el eNB y un determinado UE cuando ya se ha establecido una conexión RRC.

- **Canales lógicos de tráfico.**
 - **Dedicated Traffic Channel (DTCH):**

Canal usado tanto por el enlace descendente como ascendente y que transmite información propia de los datos de usuario en una conexión punto a punto.

- **Multicast Traffic Channel (MTCH):**

Canal usado para la transmisión de datos referente a un servicio MBMS en el enlace descendente.³

³ Ver nota 2.

Subcapa MAC: *Medium Access Control*, realiza funciones de detección y corrección de errores mediante mecanismos basados en HARQ que se diferencia de ARQ básicamente en el hecho de que HARQ solicita únicamente la fracción de la información que contiene errores, mientras que ARQ solicita la retransmisión de todo el paquete. Dichos mecanismos son aplicados a los canales de transporte. Los canales de transporte es el nombre que reciben los servicios ofrecidos por la capa física a la subcapa MAC.

Además del uso de HARQ, la subcapa MAC realiza funciones de gestión de prioridad entre canales lógicos de un mismo UE y entre distintos UEs, Los canales de transporte se clasifican en dos categorías; canales de transporte de enlace ascendente y canales de transporte de enlace descendente [23].

- **Canales de transporte de enlace descendente.**
 - **Broadcast channel (BCH).**

Empleado para el envío de información del eNB a los UE que contiene los parámetros básicos del sistema y para identificar al operador.

- **Downlink Shared Channel (DL-SCH).**

Maneja tanto información de datos de usuario como de señalización y es el canal principal por donde fluye la información de usuario desde el eNB hacia el UE.

- **Paging Channel (PCH).**

Se transmite en toda el área de cobertura del eNB para informar a los UEs de las actualizaciones en el “Sistema de Información” que no es otra cosa que el conjunto de datos que transmite el eNB para dar detalles de la configuración de la red a la cual un UE pretende acceder.

- **Multicast Channel (MCH).**

Usado para dar soporte al servicio MBMS y lleva información referente a los datos de usuario que tienen en ejecución el servicio MBMS.

- **Canales de transporte de enlace ascendente.**

- **Uplink Shared Channel (UL-SCH).**

Canal principal que se encarga del envío de datos de usuario desde el UE hacia el eNB en el enlace ascendente.

- **Random Access Channel (RACH).**

Se usa para enviar peticiones de acceso a la red y mensajes cortos de señalización.

Como es de suponerse, hay una relación muy estrecha entre los canales lógicos y los canales de transporte y por ende de estos últimos con los canales físicos. Dicha relación es llamada mapeo, es decir el traspaso de información entre canales del mismo tipo hasta llegar a la interfaz de radio. Ver figura 4.1 y figura 4.2.

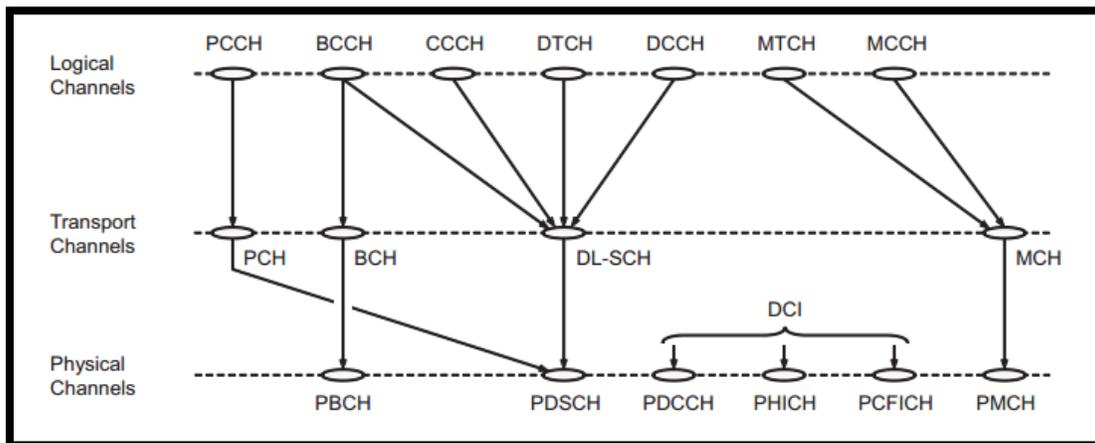


Figura 4.1 Mapeo de canales en el enlace descendente [3].

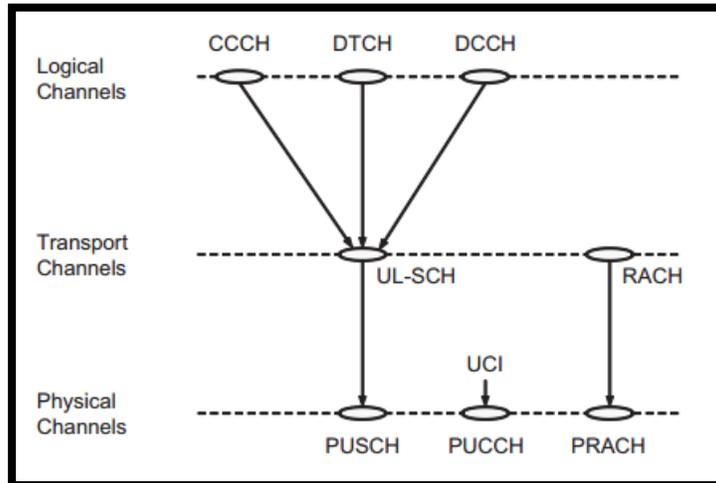


Figura 4.2 Mapeo de canales en el enlace ascendente [3].

Al mapeo de canales de tráfico y de datos entre las diferentes subcapas va implícita la encapsulación de los paquetes provenientes de la capa IP y el flujo a través de la capa LTE.

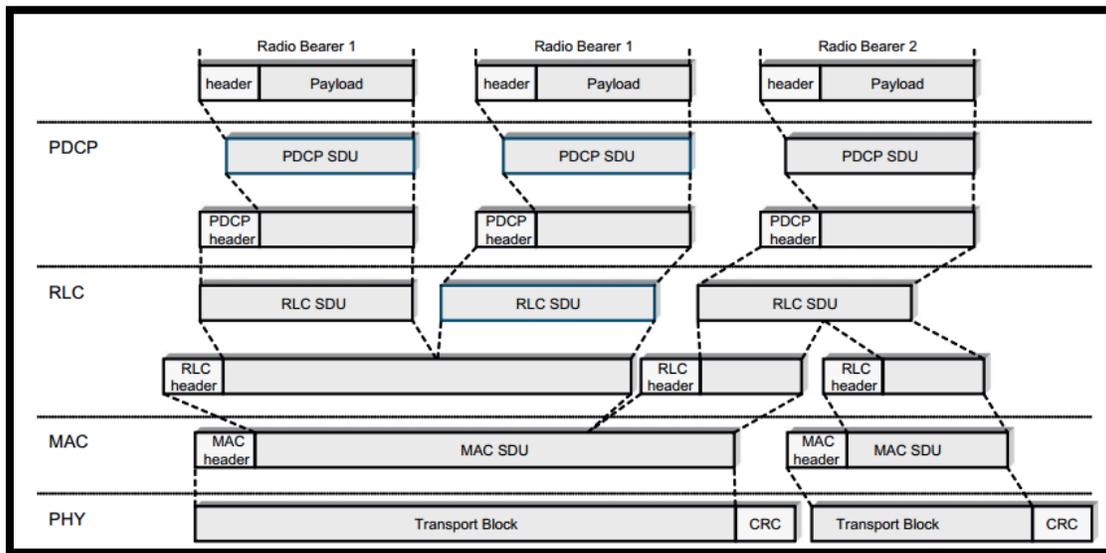


Figura 4.3 Flujo de datos [20].

Como se aprecia en la figura 4.3 cada subcapa va agregando su correspondiente encabezado una vez que ha procesado la información y que está lista para pasar a la subcapa siguiente.

El tamaño de los encabezados de las subcapas RLC y MAC puede variar de acuerdo a varios parámetros como la longitud de SN (*Sequencial Number*) de paquete, el modo de operación de la subcapa RLC, etc.

4.3 El servicio de Scheduling en LTE.

El mecanismo de scheduling empleado por LTE es uno de sus puntos más fuertes y que lo hace el sistema base de las comunicaciones futuras. Un análisis exhaustivo en de éste mecanismo sale del propósito del presente trabajo de tesis, por lo que solo se describirá de forma sencilla.

El término de scheduling se define como el mecanismo encargado de asignar de forma eficiente los recursos de radio a las distintas terminales móviles que demandan algún tipo de servicio. En particular, en LTE, el mecanismo de scheduling está implementado en el eNB dentro de la subcapa MAC, que asigna los recursos para los enlaces ascendente y descendente a través de los canales de transporte UL-SCH y DL-SCH respectivamente. El scheduling decide en que subtrama (cada 1ms) y cuantos PRBs se le asignan a un UE para realiza su transmisión o recepción de acuerdo a las condiciones particulares de su enlace.

El mecanismo de scheduling toma decisiones en a los siguientes parámetros.

- Parámetros de QoS requeridos para una determinada aplicación.
- Carga de datos almacenadas en buffer.
- Retransmisiones pendientes.
- Capacidad del UE.
- Parámetros del sistema: ancho de banda, interferencia, potencia, etc.
- Tipo de suscripción que tiene el usuario [11] [17].

Scheduling en el enlace descendente. Para este caso, cada terminal informa al eNB de una estimación de la calidad del canal. Estas estimaciones se obtienen mediante la medición en una señal de referencia transmitida por el eNB. En esta situación el scheduling decide el formato de transporte y por ende el tamaño del canal de transporte. El proceso sigue con la elección de quienes transmitirán en el canal físico PDSCH y

concluye con la elección de la modulación y la codificación para determinar con que tasa de bits se enviará la información.

Scheduling en el enlace ascendente. En este enlace, el mecanismo de scheduling determina que UEs están transmitiendo por el canal físico PUSCH, así como la subtrama y el PRB que están empleando. Debido a que para el enlace ascendente se usa SC-FDMA, los PRBs asignados a cada UE, deben ser contiguos en el dominio de la frecuencia. Mientras que el scheduling del eNB determina el formato de transporte (TF) que deberá usar cada UE, el multiplexado de canales lógicos se lleva a cabo dentro de cada UE [3]. En la figura 4.4 se cita un ejemplo de cómo puede ser explotado el mecanismo de scheduling.⁴

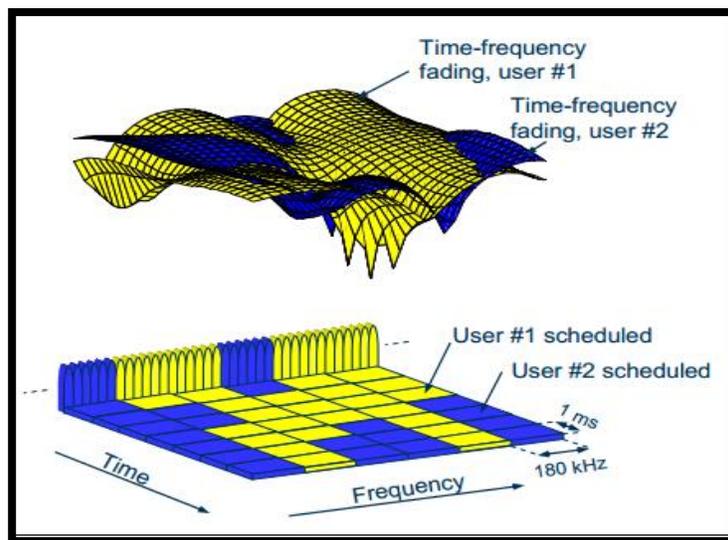


Figura 4.4 Scheduling LTE [17].

⁴ Para más detalles sobre el scheduling de LTE ver [3] y [17]

4.4 Mecanismos de Scheduling para solicitud y asignación de recursos.

El mecanismo de scheduling hace uso de diferentes técnicas para lograr su cometido. La elección de la o las técnicas más apropiadas para asignar los recursos a un conjunto de UEs depende de diversos factores, tales como; la distancia a la que se encuentra el UE del eNB, la potencia de transmisión que utilice el UE, la suscripción del UE, la velocidad a la que se mueva el UE, entre otras.

- **Control de potencia.**

Directamente ligado a la distancia que separa al UE del eNB. Es considerado para mitigar las pérdidas por multitrayecto y los desvanecimientos. Para el enlace ascendente consiste en esquemas de lazo abierto-cerrado para controlar la energía por cada elemento de recursos (RE). El eNB envía avisos periódicos al UE de la potencia que está registrando proveniente del UE, para que éste ajuste la energía por cada RE.

- **Frecuencia selectiva multi-usuario.**

Este mecanismo aplica cuando existe una gran cantidad de usuarios solicitando recursos al eNB. Como es de suponer, cada UE está en situación distinta, por lo que el eNB asignará los recursos de acuerdo a quien se encuentre en mejores condiciones de recibir y mandar información. Como su nombre lo indica, toma como punto medular el desvanecimiento selectivo de frecuencia para determinar quién o quienes tendrán activados los servicios.

- **Adaptación del enlace.**

Vinculada con el control de potencia, es una técnica empleada por el mecanismo de scheduling para determinar cuál formato de modulación y codificación se debe emplear para un determinado UE. Esto en base a la relación señal a ruido que se valla registrando en un intercambio de mensajes entre el UE y el eNB. Evidentemente entre mayor sea la relación señal a ruido el UE podrá emplea un índice de modulación más alto (64QAM) [18] [27].

- **Scheduling Dinámico.**

Las técnicas antes mencionadas permiten que el eNB realice una buena planificación totalmente dinámica (de ahí el nombre scheduling dinámico) de acuerdo a las condiciones del canal y a la demanda de recursos solicitada por los UEs. Este es el modo habitual al

que trabaja el eNB, donde la asignación de recursos es válida únicamente en determinadas subtramas. Este proceso se realiza mediante el intercambio de mensajes que son transmitidos a través del canal PDCCH y es útil para aplicaciones como; e-mail, http, FTP, entre otras, donde la transmisión es a ráfagas y la tasa de transmisión puede variar.

- **Scheduling semi-persistente.**

A diferencia del scheduling dinámico, se le indica al UE que la asignación de recursos que ha recibido es válida para un conjunto continuo de subtramas lo que le permite un continuo y hasta cierto punto ininterrumpido flujo de datos. Es útil para servicios como VoIP y videoconferencia, donde los paquetes de datos necesitan una gran fluidez al son muy sensibles a retrasos [5].

4.5 Parámetros de QoS en LTE.

Dentro de los bearers dedicados fluye tráfico al que se le quiere aplicar una determinada calidad de servicio. Por otro lado le tráfico al que no se le haya aplicado una etiqueta de calidad de servicio, es mapeado dentro del default bearer.

La aplicación de una calidad de servicio a un flujo de datos depende en gran parte del tipo de suscripción que tenga el usuario y del tipo de aplicación que se esté ejecutando en un determinado momento. Para llevar este proceso a cabo, el operador de la red puede ofrecer distintos planes de servicios de acuerdo a las necesidades de cada tipo de usuario. Por ejemplo el plan de servicios “Gold”, tendrá las más altas prestaciones en cuanto a prioridad de asignación de recursos y velocidad por lo que sería el más costoso mientras que un servicio “Bronze”, puede ser el plan más básico con algunas deficiencias y por lo tanto el más barato.

Los parámetros en los que se basa el sistema LTE para aplicar un determinado nivel de QoS a un flujo de datos son:

- **Tipo de EPS Bearer:** esto es, si se trata de bearers que manejan tasas de datos garantizadas o no garantizadas

- *Guaranteed Bit Rate Bearer (GBR-Bearer)*: este tipo de bearer tiene asociados dos valores; la tasa mínima garantizada y la tasa máxima garantizada. La primera, como su nombre lo indica, nos avisa de la tasa mínima que puede esperar un UE y que nunca será inferior a ese valor. Por el contrario, la tasa máxima garantizada es un promedio de los valores pico de las tasas de transmisión más altas que se pueden alcanzar y que delimita un servicio. Es útil para aplicaciones que requieren un flujo continuo de datos.
- *Non Guaranteed Bit Rate Bearer (Non-GBR Bearer)*: este tipo de bearer no ofrece garantía alguna para las tasas de transmisión por lo que durante un enlace la tasa varía, en algunos instantes será alta y en otros baja. Este tipo de bearer es útil para la transmisión a ráfagas.
- **QoS Class Identifier (QCI)**: es un valor escalar que indica una prioridad, un retraso máximo y una tasa de bits en error permitida. También de acuerdo a su valor indica si se trata de un GBR Bearer o de un Non-GBR Bearer. Un valor bajo indica una prioridad alta por lo que en una red congestionada los paquetes con que tengan un QCI de valor N , serán procesados antes que los paquetes con un QCI de valor $N+1$.
- **Allocation and Retention Priority (ARP)**: usado para el control de admisión, es decir funciona para decidir que bearer se activa, desactiva o modifica primero en la red en caso de congestión. Es un valor entero entre 1 y 16 [28].

Los parámetros mencionados se condensan en la tabla 4.1, donde se tienen los distintos valores de QCI asociados a cada tipo de bearer, la tasa de bit en error máxima para cada bearer y retraso admisible para cada valor de QCI, así como también ejemplos de las aplicaciones que se podrían ejecutar en un UE.

Tabla 4.1 Campos del QCI para QoS en LTE [29].

QCI	Tipo de Bearer	Prioridad	Retraso de paquetes (ms)	Tasa de bits en error	Ejemplo
1	GBR	2	100	10^{-2}	Conversaciones de voz
2	GBR	4	150	10^{-3}	Video llamadas
3	GBR	5	300	10^{-6}	Video (buffered streaming)
4	GBR	3	50	10^{-3}	Juegos en tiempo real
5	Non GBR	1	100	10^{-6}	Señalización IMS
6	Non GBR	7	100	10^{-3}	Juegos interactivos
7	Non GBR	6	300	10^{-6}	Video (Buffering)
8	Non GBR	8	300	10^{-6}	e-mail, FTP, P2P y www
9	Non GBR	9	300	10^{-6}	e-mail, FTP, P2P y www

Los GBR Bearers son útiles para aplicaciones que requieren un flujo continuo de datos donde se asegure una tasa de transmisión para tener una mínima pérdida de paquetes, tal es el caso de las llamadas de voz y de video, aplicaciones que son muy sensibles a retrasos.

CAPÍTULO 5

Aspectos teóricos, VoIP y flujo de datos en LTE

5.1 Introducción.

La voz sobre protocolo de internet o simplemente VoIP permite la transmisión de la señal de voz una vez que ha sido digitalizada a través de la red de Internet mediante la conmutación de paquetes, lo que representa una ventaja para los proveedores pues ya no prestarían un enlace dedicado por llamada, si no que a través de la red pueden conmutar la información de diferentes conversaciones y enviarlas por un solo enlace compartido. Por ello, es importante tener las bases de cómo se procesa la voz así como las ventajas, en términos de ancho de banda y calidad, que se tienen al emplear un determinado códec de voz.

En este capítulo se verán las características más importantes de varios codecs empleados para la transmisión de VoIP, la calidad de llamada que es posible alcanzar con cada códec, así como el proceso de flujo de datos al que es sometido un paquete de voz al ser digitalizado y enviado a través de la red LTE.

5.2 Proceso de codificación de VoIP.

El proceso para la transmisión de señales de voz a través de Internet conlleva las siguientes etapas:

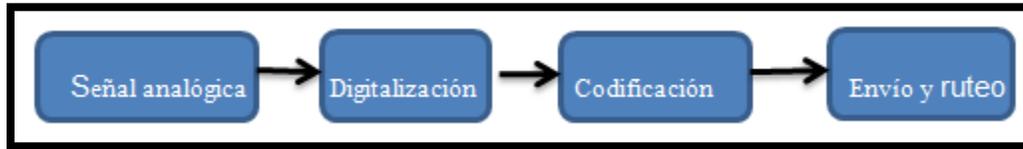


Figura 5.1 Proceso de VoIP.

El proceso indicado arriba se muestra hasta la parte de la red troncal, la fase siguiente es el proceso opuesto; decodificación, conversión de digital a analógica y finalmente el destino final. En las etapas de digitalización y codificación de la señal, VoIP hace uso de distintos estándares y codificadores, cada uno de los cuales, posee diferentes características. Véase tabla 5.1.

Tabla 5.1 Codecs usados en VoIP [30].

Codec	Bitrate (kb/s)	Frame (ms)	Bits per frame	Compression type	Complexity (MIPS) ^c	MOS
<i>Narrowband codecs</i>						
G.711	64	0.125	8	PCM	≤1	4.1 ^d
G.723.1	6.3	30	189	MP-MLQ	≤18	3.8
G.723.1	5.3	30	159	ACELP	≤18	3.6
G.726	16	0.125	2	ADPCM	≈1	–
G.726	24	0.125	3	ADPCM	≈1	3.5
G.726	32	0.125	4	ADPCM	≈1	4.1
G.728	16	0.625	10	LD-CELP	≈30	3.61
G.729	8	10	80	CS-ACELP	≤20	3.92
G.729A	8	10	80	CS-ACELP	≤11	3.7
G.729D	6.4	10	64	CS-ACELP	<20	3.8
G.729E	11.8	10	118	CS-ACELP LPC	<30	4
GSM-FR	13	20	260	RPE-LTP	≈4.5	3.6
GSM-HR	5.6	20	112	VSELP	≈30	3.5
GSM-EFR	12.2	20	244	ACELP	≈20	4.1
AMR-NB	4.75–12.2	20	95–244	ACELP	15–20	3.5–4.1
iLBC	13.33	30	400	LPC	18	3.8
iLBC	15.2	20	304	LPC	15	3.9
Speex (NB)	2.15–24.6	20	43–492	CELP	8–25	2.8–4.2
BV16	16	5	80	TSNFC	12	4
<i>Broadband codecs</i>						
G.722	48, 56, 64	0.0625	3–4	SB-ADPCM	5	~4.1
G.722.1	24,32	20	480, 640	MLT	<15	~4
AMR-WB (G.722.2)	6.6–23.85	20	132–477	ACELP	≈38	Various
Speex (WB)	4–44.2	20	80–884	CELP	8–25	Various
iSAC	Variable	Adaptive	Adaptive-variable	Transform coding	6–10	Various ^e
BV32	32	5	160	TSNFC	17.5	~4.1

De los campos indicados, la columna titulada MOS (*Measure Opinion Score*), es un indicador de la calidad de las llamadas según el codificador empleado. El valor de MOS puede variar desde 1 hasta 5 donde el valor más bajo indica una calidad muy pobre y el valor más alto indica la calidad más alta.

Tabla 5.2 Valores de MOS [24].

MOS	Quality	Impairment
5	Excellent	Imperceptible
4	Good / Toll Quality	Perceptible but not annoying
3	Fair	Slightly annoying
2	Poor	Annoying
1	Bad	Very annoying

5.3 Cálculos para el flujo de datos.

Puesto que nuestro cometido es saber la capacidad de llamadas de una red LTE, es útil saber los requerimientos en términos de tasas de transmisión de cada códec que se usó. Cabe mencionar que de los codecs mostrados en la tabla 5.1, se emplearon los siguientes: G.711, G.729, G.723, G.726, G.728, G.722.2 y AMR.

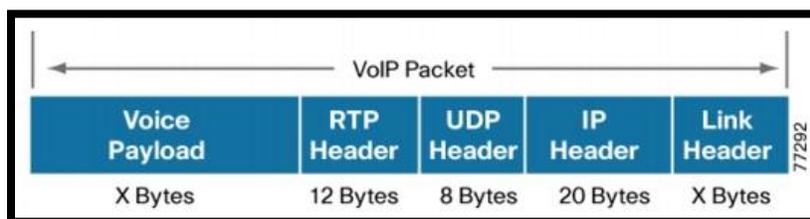


Figura 5.2 Estructura del paquete de VoIP.

Así el campo “Voice Payload” o carga útil de voz, es la parte que lleva la información de la voz digitalizada y su tamaño depende del códec empleado. Por otro lado la parte de “Link Header”, se refiere al encabezado añadido en la parte de transporte de la capa LTE. La tasa en bits por segundo que genera cada códec se puede obtener mediante la siguiente expresión.

$$tasa (bps) = \frac{(carga_{bytes}) \times \left(\frac{bits}{muestra}\right)}{intervalo\ de\ muestreo} \quad (5.1)$$

La carga en bytes es el tamaño del paquete de voz que forma el códec y el intervalo de muestreo es el periodo en ms que emplea el códec para generar un paquete de voz. Los valores de la carga e intervalos de muestreo se obtuvieron de [32].

Una vez que el códec ha generado una determinada tasa en bps, el proceso continua con la agregación de los encabezados RTP/UDP/IP cuyo total es de 40 bytes. Que se suman a la carga. Consecuentemente el proceso de encapsulación sigue con la agregación de los encabezados propios de la capa LTE; PDCP/RLC/MAC, que fijamos en 2/5/5 bytes respectivamente y resaltando que la subcapa RLC opera en modo UM.

La cantidad de paquetes por segundo y la tasa que cada códec genera a nivel de la capa física de LTE de cada UE son datos útiles que sirven tanto para determinar la capacidad del sistema como para la corroboración de la información mediante OPNET MODELER. Estos datos se obtienen mediante las siguientes expresiones, mismas que se aprecian en la tabla 5.3.

$$Paquetes\ por\ segundo = \frac{1}{intervalo\ de\ muestreo} \quad (5.3)$$

$$tasa_{LTE\ PHY} = \frac{(Carga+52\ bytes) \times 8}{intervalo\ de\ muestreo} \quad (5.4)$$

Tabla 5.3 Tasas y carga para cada códec VoIP.

CODEC	CARGA [bytes]	INTERVALO [ms]	TASA [Kbps]	TASA LTE PHY [Kbps]	PAQUETES POR SEG.
G.711	80	10	64	105.6	100
G.729	10	10	8	49.6	100
G.723.1	24	30	6.4	20.2666667	33.33
G.723.1	20	30	5.3	19.2	33.33
G.726	25	5	40	123.2	200
G.726	15	5	24	107.2	200
G.728	10	5	16	99.2	200
AMR	30.5	20	12.2	33	50
G.722.2	16.0625	10	12.85	54.45	100

Para fines ilustrativos a continuación se presentan los throughputs alcanzados por LTE, ya sea si se emplea un sistema basado en FDD (estructura de trama 1) o un sistema basado en TDD (estructura de trama 2).

Tabla 5.4 Throughput máximo en enlace descendente para FDD [33]

Channel bandwidth, MHz		1.4	3	5	10	15	20
Number of Resource Blocks		6	15	25	50	75	100
Modulation	MIMO	Data Rate ¹ , Mb/s					
QPSK	Not Used	1.728	4.32	7.2	14.4	21.6	28.8
16 QAM	Not Used	3.456	8.64	14.4	28.8	43.2	57.6
64 QAM	Not Used	5.184	12.96	21.6	43.2	64.8	86.4
64 QAM	2x2	10.368	25.92	43.2	86.4	129.6	172.8
64 QAM	4x4	20.736	51.84	86.4	172.8	259.2	345.6

Tabla 5.5 Throughput máximo en enlace ascendente para FDD [33]

Channel bandwidth, MHz		1.4	3	5	10	15	20
Number of Resource Blocks		6	15	25	50	75	100
Modulation	MIMO	Data Rate ^a , Mb/s					
QPSK	Not Used	1.8	4.5	7.5	15	22.5	30
16 QAM	Not Used	3.45	8.64	14.4	28.8	43.2	57.6
64 QAM	Not Used	5.184	12.96	21.6	43.2	64.8	86.4

Estos datos toman en consideración que se usa únicamente un símbolo para mecanismos de control PDCCH y no contempla codificación. Además se hace notar que los canales PUCCH consumen gran cantidad de recursos.

Tabla 5.6 Throughput para el modo TDD [34].

Config. No.	Downlink/Uplink	Approx. peak data rates (DL/UL)
0	2:3	41 / 32 Mbps
1	3:2	62 / 22 Mbps
2	4:1	82 / 11 Mbps
3	7:3	64 / 15 Mbps
4	8:2	82 / 11 Mbps
5	9:1	94 / 5 Mbps
6	5:5	57 / 27 Mbps

En este caso, se asume que el canal es de 20 MHz con un duplexado espacial MIMO 2x2 para el enlace descendente y 1x2 para el enlace ascendente, además de que se quitan 10% de los recursos empleados para la conmutación entre enlace descendente y ascendente. Por otro lado, en la subtrama especial se dejan las configuraciones que asignan las cantidades más pequeñas de símbolos tanto para DwPTS y UpPTS, 3 y 1 respectivamente.

Los datos mostrados sirven como base para el desarrollo del modelo teórico que se propone en esta tesis, pues son una referencia de los valores que aproximadamente se desean obtener.

CAPÍTULO 6

Modelo teórico para el cálculo de throughput y capacidad de llamadas de VoIP.

6.1 Introducción

Para poder determinar la cantidad de llamadas a las que se les puede brindar soporte en una célula LTE, es imprescindible saber la cantidad de recursos en términos de Resource Elements (una subportadora y un símbolo) que quedan disponibles una vez que se han utilizado los canales de control, señalización, sincronización y canales de acceso. Una vez, determinada dicha cantidad se puede estimar el throughput y por ende la cantidad de llamadas que son realizadas con éxito.

En este capítulo se presenta un modelo teórico que puede ser aplicado a la rejilla de recursos de LTE para determinar, a través de ecuaciones sencillas, la cantidad de recursos de los que se puede disponer para la realización de llamadas de VoIP con distintos codecs. Asimismo, se desarrolla un ejemplo basado en un canal de 3 MHz, con el objetivo de demostrar cómo funciona el modelo.

6.2 Consideraciones generales del modelo teórico.

El modelo se maneja bajo las siguientes consideraciones:

- Se presenta un primer sistema de caracterización cuyo ancho de banda es de 3 MHz que posteriormente se escala a un sistema de 20 MHz.
- El sistema está basado en TDD.
- Es posible utilizar cualquiera de los índices de configuración TDD (0-6).
- Es posible utilizar cualquiera de los índices de configuración de la subtrama especial (0-8).
- Se utilizan dos símbolos para el PDCCH en el canal de 3MHz.
- Se utilizan 3 símbolos para el PDCCH en el canal de 20 MHz.
- Para las subtramas especiales se usan como máximo 2 símbolos para el PDCCH.
- La cantidad de recursos asignados al PUCCH depende del ancho de banda del sistema. Ver tabla 6.1.
- Las señales de referencia (RS) que se toman en cuenta en las subtramas de downlink y especiales varían en cantidad de 4 a 6 de acuerdo a la subtrama de que se trate y al índice de subtrama especial.
- Las señales SRS tienen una periodicidad de acuerdo a la configuración TDD.
- Se usa un prefijo cíclico normal.
- No hay multiplexado espacial MIMO.

Tabla 6.1 PRBs asignados al PUCCH [2].

Canalización (MHz)	Número de PRBs asignados	Número de canales PUCCH
1.4	2	1
3	4	2
5	8	4
10	16	8
20	32	16

6.3 Ubicación de canales y cálculo de throughput.

La ubicación de todos los elementos de control tanto para el enlace ascendente como descendente se basan en [2], [5], [11], [17] y [26]. Donde se indica la posición en toda la rejilla de recursos LTE de cada uno de los canales.

- PDCCH: se ubica en los primeros 2 o 3 símbolos de las subtramas dedicadas al enlace descendente y subtramas especiales. Ocupan todas las subportadoras del sistema e incluyen señales de referencia (RS), el PCFICH y los PHICH que se agrupan en grupos de 4 subportadoras y ocupan únicamente un símbolo.
- Señales RS: se usan 8 señales de referencia en cada subtrama de enlace descendente o subtrama especial.
- P-SCH: usado para la sincronización, se ubica dentro de las subtramas especiales en el tercer símbolo y 72 subportadoras ubicadas al centro de la banda de frecuencia en que opera el sistema.
- S-SCH: canal de sincronización secundaria, se ubica en dos de las subtramas dedicadas al enlace descendente y está ubicado en el último símbolo de las subtramas correspondientes ocupando 72 subportadoras.
- PBCH: este canal va siempre en el segundo slot de la primera subtrama, ocupando 4 símbolos y 72 subportadoras ubicadas al centro de la banda de frecuencia en la que opera el sistema.
- PUCCH: se ubica en los extremos de la banda de operación y su cantidad depende de la canalización. Ocupa los 14 símbolos de las subtramas dedicadas al enlace ascendente.
- DM-RS: estas señales se ubican a lo largo de la zona de PUSCH en los símbolos 3 y 10 de cada subtrama de enlace ascendente.
- SRS: estas señales van en el último símbolo de las subtramas de enlace ascendente y se extienden en todo lo largo de la zona PUSCH.

Para la determinación de los Resource Elements asignados a datos y a mecanismos de control nos apoyamos en la herramienta de rejilla LTE web [35]. Con el objetivo de presentar una especie de guía para dicho cálculo, a continuación se presenta un ejemplo, tomando para ello el índice de configuración TDD 6 (DL/S/UL = 3/2/5), el índice de configuración de subtrama especial 4 (DwPTS/GP/UpPTS = 12/1/1).

Esta elección se basa en el hecho de que con dichos índices se obtiene el mejor aprovechamiento de los recursos. En el capítulo siete se muestra una tabla con los throughputs obtenidos.

De acuerdo a la figura 3.7 del capítulo tres, la cantidad de subtramas completas dedicadas al enlace ascendente son cinco, mientras que las subtramas completas dedicadas al enlace descendente son tres y por último se tienen dos subtramas especiales. Puesto que el índice de configuración cuatro de la subtrama especial contempla 12 símbolos para DwPTS estos pueden emplearse para el envío de datos y por consiguiente, las subtramas especiales pueden considerarse como subtramas de enlace descendente. Ver figuras 6.1 a y 6.1 b.

En este punto, es útil resaltar que en la subtrama especial, existen casos donde se asignan tres símbolos al DwPTS, en tales casos las subtramas no utilizan los resource elements restantes, una vez que se han quitado los de control, para la transmisión de datos por lo que toda(s) la(s) subtrama(s) se desperdician en control y no hay aportación de dicha(s) subtrama(s) al throughput.

Este mismo caso aplica para el UpPTS que de acuerdo a la tabla 3.5 del capítulo tres, se le asigna un máximo de dos símbolos, por lo que de las subtramas especiales tampoco tienen aportación al throughput de enlace ascendente.

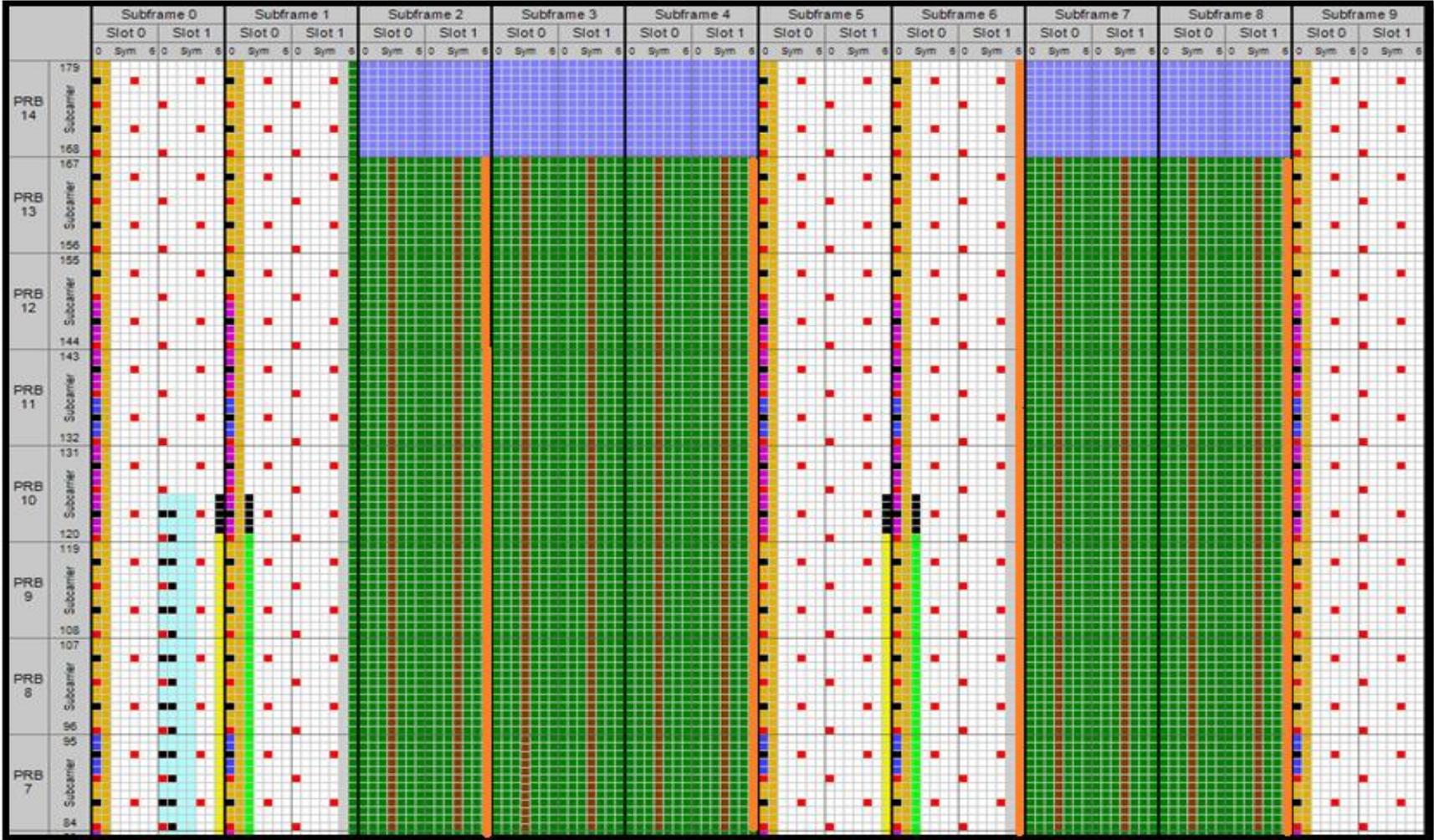


Figura 6.1a Localización de los canales de control y datos en TDD

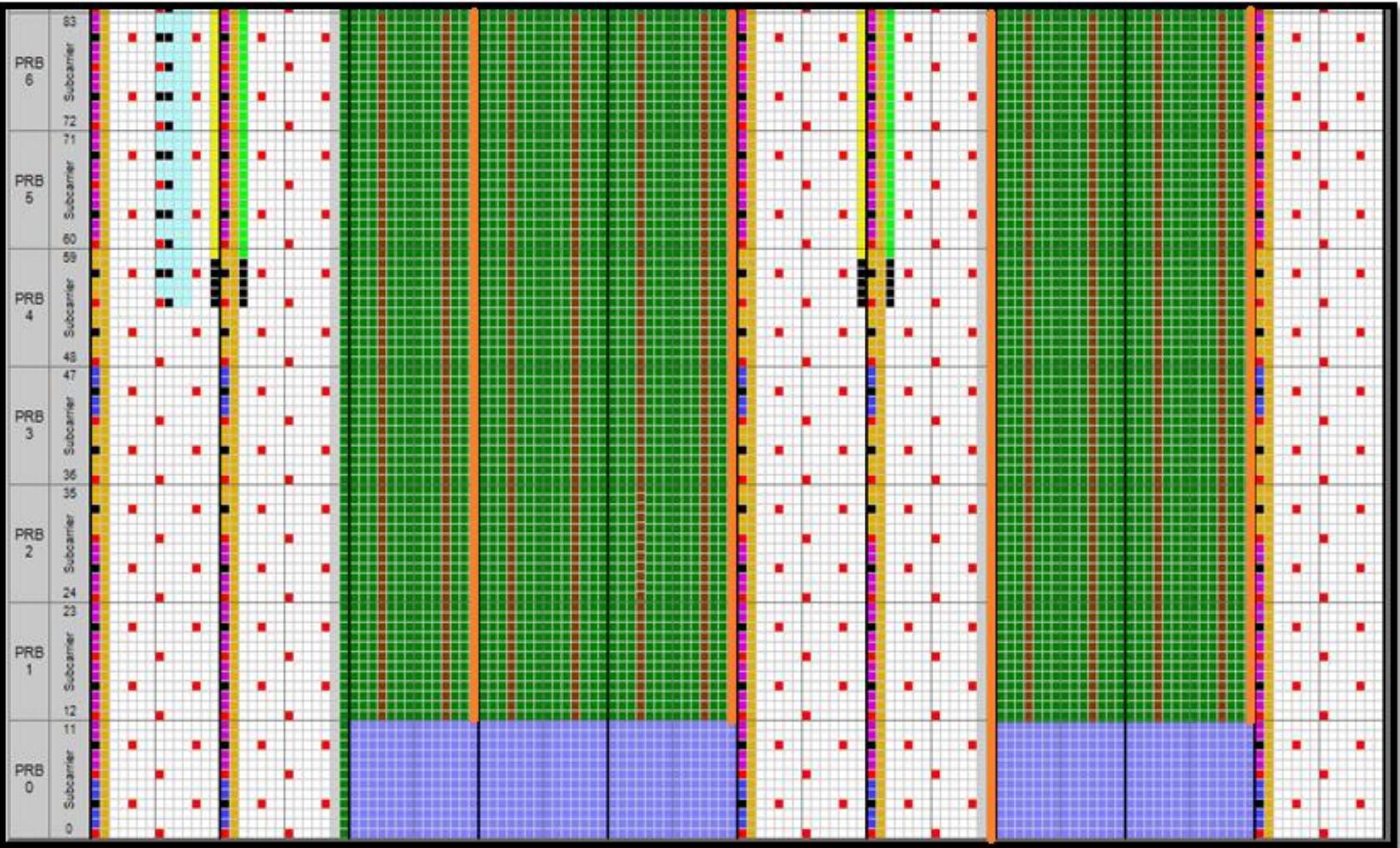


Figura 6.1b Localización de los canales de control y datos en TDD

La nomenclatura de colores es la siguiente:

■ PCFICH	■ P-SCH	■ PUCCH
■ PHICH	■ S-SCH	■ SRS
■ PDCCH	■ PBCH	■ DM-RS
□ PDSCH	■ RS	
■ GP	■ PUSCH y UpPTS	

La figura 6.1 a y 6.1b son tomadas de [35] para el caso de 3 MHz, sin embargo en la misma aplicación es posible implementar el caso para 20 MHz.

En primera instancia el cálculo del throughput se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$Throughput [bps] = (RE_{TOTALS} - RE_{CONTROL}) * 100 * m * cr \quad (6.1)$$

El valor de RE_{TOTALS} dependerá de la cantidad de subtramas asignadas para los enlaces ascendente y descendente así como de la cantidad de símbolos que ocupe el campo DwPTS en la subtrama especial. Si dicha cantidad es de 3 (índices 0 y 5), no existe aportación de Resource Elements para datos por parte de las subtramas especiales. La ecuación 6.1 se aplica al enlace ascendente y descendente tomando para cada caso las subtramas dedicadas a cada enlace.

6.4 Throughput de enlace descendente.

Se toma la ecuación 6.1 y se descompone en factores para determinar la aportación de las subtramas dedicadas al enlace descendente y la aportación de las subtramas especiales en términos de resource elements (REs).

$$RE_{TOTALS} = RE_{TOTDL} + RE_{TOTSS} \quad (6.2)$$

$$RE_{CONTROL} = RE_{CONDL} + RE_{CONSS} + RE_{P-SCH} \quad (6.3)$$

Donde el único termino conocido es el de RES_{P-PSCH} , su valor es de 144 REs y solo se toma en cuenta si hay aportación de REs de datos de las subtramas especiales al throughput total, es decir mientras la subtrama especial no esté configurada con los índices 0 y 5. A continuación se realiza el desarrollo de los elementos RE_{TOTDL} y RE_{TOTSS} de la ecuación 6.2 y que resultan en las ecuaciones 6.4 y 6.5 respectivamente.

$$RE_{TOTDL} = 12 \times \text{Simbolos OFDM} \times NPRBs \times \text{SubtramasDL} \quad (6.4)$$

En la ecuación 6.4, el valor de “12” se refiere a las subportadoras que compone un PRB, mientras que el término “*Simbolos OFDM*” indica los 6 o 7 símbolos OFDM que componen un slot según el uso de un prefijo cíclico extendido o normal respectivamente. El término “*NPRB*” es el número total de PRBs disponibles en el sistema y por último “*SubtramasDL*” indica el número de subtramas dedicadas al enlace descendente.

$$RE_{TOTSS} = 12 \times \text{SimDwPTS} \times NPRBs \times SS \quad (6.5)$$

En ecuación 6.5; “*SimDwPTS*” indica la cantidad de símbolos que son asignados a dicho campo y que depende del índice de configuración de la subtrama especial. Por otro lado el término “*SS*” indica la cantidad de subtramas especiales que hay.

Ahora se realiza el desarrollo para los términos $RE_{COND L}$ y RE_{CONSS} pertenecientes a la ecuación 6.3 y que representan la aportación de REs de control y señalización de las subtramas dedicadas y especiales respectivamente. Ecuaciones 6.6 y 6.7.

$$RE_{COND L} = (PDCCH \times 12 \times NPRB \times SubDL) + PBCH + S - SCH + RS \quad (6.6)$$

Dónde:

- PDCCH: es el número de símbolos asignados al PDCCH (1-3).
- PBCH: su valor es de 288 REs.
- S-SCH: Su valor es de 144 REs.
- RS: señales de referencia (4-6).

La cantidad de REs de control y señalización que generan las subtramas especiales se aprecia en la siguiente expresión.

$$RE_{CONSS} = (PDCCH \times 12 \times NPRB \times SS) + RS \quad (6.7)$$

Dónde:

- SS: Subtramas especiales, su valor es de 1 o 2 dependiendo del índice TDD.
- RS: señales de referencia, solo se consideran si hay aportación de REs de datos de la subtramas especiales.

Una vez que se ha realizado el cálculo para las ecuaciones de la 6.4 a la 6.7, se sustituyen los valores obtenidos correspondientes a las ecuaciones 6.2 y 6.3, para después aplicar el resultado en la siguiente ecuación.

$$Th_{DL} = (RE_{TOTALES} - RE_{CONTROL}) * 100 * m * cr \quad (6.8)$$

6.5 Throughput de enlace ascendente.

A diferencia del caso de enlace descendente la ecuación 6.1 no requiere descomponerse en términos de subtramas dedicadas y especiales, ya que en las subtramas especiales, la duración máxima del UpPTS es de dos símbolos y por ende no se utiliza para la transmisión de datos. De ésta forma el throughput se calcula de acuerdo a la ecuación 6.9

$$Th_{UL} = (RE_{TOTALES} - RE_{CONTROL}) * 100 * m * cr \quad (6.9)$$

Dónde únicamente hay que determinar el valor de los términos $RE_{TOTALES}$ y $RE_{CONTROL}$. Para el primer término, el cálculo se realiza mediante la siguiente ecuación.

$$RE_{TOTALES} = 12 * 14 * NPRB * SubUL \quad (6.10)$$

Dónde:

- El valor de 12 y 14 representan a las subportadoras y símbolos de un PRB respectivamente.
- *NPRB*: es la cantidad de PRBs disponibles en el sistema.
- *SubUL*: subtramas dedicadas al enlace ascendente. Varía según el índice TDD.

Por otro lado, el desarrollo para el término $RE_{CONTROL}$, se realiza a través de la ecuación 6.11.

$$RE_{CONTROL} = PUCCH + PRACH + DMRS + SRS \quad (6.11)$$

Dónde:

- *PUCCH*: depende de la tabla 6.1. y su valor en términos de REs se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$PUCCH = 12 * SimOFDM * PRBs * SubUL \quad (6.12)$$

- *PRACH*: tiene valor de 72 subportadoras en el dominio de la frecuencia, mientras que para el dominio del tiempo su longitud varía de una a tres subtramas completas. Por lo que su valor en REs es:

$$PRACH = 72 * 14 * SubPRACH \quad (6.13)$$

- *DMRS*: su valor en REs está dado por:

$$12 * 2 * (NPRB - PUCCH) * SubSinPRACH + 12 * 2 * (NPRB - PUCCH - 6) * SubPRACH \quad (6.14)$$

- *SRS*: depende de la periodicidad empleada para dichas señales, misma que puede ser de 2, 5, 10 y 20 ms. Su valor está dado por:

$$SRS = 12 * (NPRB - PUCCH) * Colum \quad (6.15)$$

Las ecuaciones mostradas, se implementaron en el software de ingeniería MATLAB para facilitar los cálculos y la generación de las gráficas respectivas. Dicha implementación es dinámica y es posible manipular tanto el índice TDD como la configuración de la subtrama especial.

6.6 Ejemplo de cálculo del throughput.

Hasta este punto es posible que la aplicación de las ecuaciones (6.2-6.15) para obtener el throughput de cada enlace resulte un tanto confuso. Por ello, éste apartado se centra en el desarrollo de un ejemplo que sirva como guía para la obtención del throughput en base al modelo teórico aquí presentado.

Para comenzar a desarrollar el ejemplo, tomamos el sistema de 3 MHz con índice TDD 6 (UL/DL/S = 5/3/2) y configuración de subtrama especial 4 (DwPTS/GP/UpPTS = 12/1/1).

- **Enlace descendente:** tomamos las ecuaciones 6.4 y 6.5.

$$RE_{TOTDL} = 12 * 14 * 15 * 3 = 7,560 REs$$

$$RE_{TOTSS} = 12 * 12 * 15 * 2 = 4,320 REs$$

El siguiente paso es tomar las ecuaciones 6.6 y 6.7 y reemplazar los valores correspondientes al sistema de 3 MHz, de tal forma que dichas ecuaciones quedan respectivamente como sigue:

$$RE_{CONDL} = (2 * 12 * 15 * 3) + 288 + 144 + 258 = 1,770 REs$$

$$RE_{CONSS} = (2 * 12 * 15 * 2) + 180 = 900 REs$$

Posteriormente se toman las ecuaciones 6.2 y 6.3 para determinar de forma total, en una trama TDD, la cantidad correspondiente de REs de datos y de control. Así para la ecuación 6.2 tenemos:

$$RE_{TOTALES} = 7560 REs + 4320 REs = 11,880 REs$$

Mientras que para la ecuación 6.3 se tiene que:

$$RE_{CONTROL} = 1770 REs + 900 REs + 144REs = 2,814 REs$$

Para finalizar, se toma la ecuación 6.8 que determina la cantidad de REs que quedan una vez que se han usado los REs asignados a control y que en consecuencia serán asignados para los datos de usuario.

$$Th_{DL} = (11880 REs - 2814 REs) * 100 * m * cr = 906,600 REs * m * cr$$

A este último resultado, solo restaría multiplicarlo por m y $c.r.$, mismo que se eligen de acuerdo a la tabla 3.2 (ver capítulo tres).

- **Enlace ascendente:** para iniciar con el cálculo para el caso de enlace ascendente, se toma la ecuación 6.10 de tal forma que se tiene lo siguiente:

$$RE_{TOTALES} = 12 * 14 * 15 * 5 = 12,600 REs$$

Posteriormente se utilizan las ecuaciones 6.12, 6.13, 6.14 y 6.15 sustituyendo los valores correspondientes al sistema de 3MHz. Así, comenzando con la ecuación 6.12 tenemos:

$$PUCCH = 12 * 7 * 4 * 5 = 1,680 REs$$

De la ecuación 6.13 tenemos:

$$PRACH = 72 * 14 * 1 = 1,008 REs$$

De la ecuación 6.14 tenemos:

$$12 * 2 * (15 - 2) * 4 + 12 * 2 * (15 - 2 - 6) * 1 = 1,416 REs$$

Posteriormente para la ecuación 6.15 tenemos:

$$SRS = 12 * (15 - 2) * 4 = 624 REs$$

En seguida, el siguiente paso es sustituir los valores obtenidos anteriormente en la ecuación 6.11, de tal forma que obtenemos lo siguiente:

$$RE_{CONTROL} = 1,680 + 1,008 + 1,416 + 624 = 4,728 REs$$

Para finalizar se tiene que sustituir los valores obtenidos de $RE_{TOTALES}$ y de $RE_{CONTROL}$ en la ecuación 6.9 para obtener la cantidad de REs que serían usados para la transmisión de datos de usuario. Así la ecuación 6.9 queda de la siguiente forma:

$$Th_{UL} = (12,600 - 4,728) * 100 * m * cr = 787,200 REs * m * cr$$

Al igual que para el enlace descendente, únicamente restaría multiplicar el valor obtenido por los valores de m y $c.r.$ que se toman de la tabla 3.2 en el capítulo tres.

Como se aprecia, tanto en el caso de enlace ascendente como descendente, el throughput está en términos de los REs que están disponibles para la transmisión de datos. El modelo implementado es capaz de usar los 29 valores de code rate que aparecen en la tabla 3.2, aunque en particular en el presente trabajo de tesis, únicamente se presentan los resultados de los índices MCS 9 y 28. En el caso del índice MCS = 28 se tiene la modulación más eficiente y la codificación más alta por lo cual resulta obvia su elección. Mientras que para el índice MCS = 9, se tiene la modulación QPSK con la tasa de codificación más alta posible para dicha modulación y la razón de su elección es que es la contraparte del índice 28, es decir la modulación más robusta con su correspondiente codificación más alta.

Ambos valores se aplican a los sistemas de 3 MHz y 20 MHz. Así pues, siguiendo con el ejemplo para el sistema de 3 MHz, tenemos que:

- $MCS_{INDEX} = 9$:

$$Th_{UL} = 787,200 REs * 2 * 0.61 = 0.960384 Mbps$$

$$Th_{DL} = 906,600 REs * 2 * 0.61 = 1.106 Mbps$$

- $MCS_{INDEX} = 28$:

$$Th_{UL} = 787,200 \text{ REs} * 6 * 0.81 = 3.825 \text{ Mbps}$$

$$Th_{DL} = 906,600 \text{ REs} * 6 * 0.81 = 4.406 \text{ Mbps}$$

6.7 Cálculo de la capacidad de llamadas.

Para ejemplificar el cálculo de la capacidad de llamadas en una célula LTE consideramos el códec G.711 por su popularidad. En el capítulo siete presentan las tablas que contienen la información de los codecs restantes y los datos respectivos a cada uno, así como el caso del canal de 20 MHz y los datos que se obtuvieron.

Como primer paso, se debe emplear la siguiente expresión, ya sea para el enlace ascendente o descendente, según se requiera.

$$NumLlam_{DL/UL} = \frac{Th_{DL/UL}}{Tasa_{LTEPHY}} \quad (6.16)$$

Para el códec G.711 la tasa de transmisión a nivel de capa física de LTE es de 105.6 Kbps, por lo que de la ecuación 6.16 tenemos:

- Para el caso de $MCS_{INDEX} = 9$:

$$NumLlam_{UL} = \frac{960.384 \text{ Kbps}}{105.6 \text{ Kbps}} = 9$$

$$NumLlam_{DL} = \frac{1.106 \text{ Mbps}}{105.6 \text{ Kbps}} = 10$$

Es importante recordar que a pesar de que al realizar la división el resultado es un valor con cifras decimales se tiene que redondear al valor entero inferior.

- Para el caso de $MCS_{INDEX} = 28$:

$$NumLlam_{UL} = \frac{3.825 \text{ Mbps}}{105.6 \text{ Kbps}} = 36$$

$$NumLlam_{DL} = \frac{4.406 \text{ Mbps}}{105.6 \text{ Kbps}} = 41$$

Como ya se mencionó, los datos pertenecientes a los 8 codecs restantes se muestran en el capítulo siete como resultados de la aplicación del modelo teórico aquí propuesto y que ha sido aplicado tanto al canal de 3 MHz como al de 20 MHz.

CAPÍTULO 7

Resultados obtenidos.

7.1 Organización de los resultados.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la siguiente forma:

- En la sección 7.2 se presentan los throughputs obtenidos con el modelo teórico en forma de tablas para los sistemas de 3 MHz y 20 MHz.
- La sección 7.3 incluye la validación del modelo teórico mediante algunas simulaciones realizadas con el software OPNET MODELER.
- La sección 7.4 contiene los datos referentes a la capacidad de llamadas para el canal de 20 MHz con todos los codecs mencionados, acompañados de las gráficas respectivas.
- Por otro lado en la sección 7.5 se muestra una tabla como resumen de todos los resultados para la capacidad de llamadas tanto para 3 MHz como para 20 MHz.

7.2 Resultados obtenidos para el Throughput.

Puesto que parte del objetivo es identificar la configuración que logra el throughput más simétrico entre el enlace descendente y ascendente, la elaboración de las tablas de este apartado únicamente incluye los índices TDD 1 y 6, ya que al observar la figura 3.7 (capítulo tres), dichas configuraciones tienen las cantidades más semejantes de subtramas dedicadas al enlace descendente y ascendente.

Por otro lado, en cuanto a las subtramas especiales, solo son considerados los índices 0, 1, 2, 3 y 4, que corresponden a las asignaciones de símbolos para el DwPTS de; 3, 9, 10, 11 y 12 respectivamente. Los índices 5, 6, 7 y 8 se descartan ya que la asignación de símbolos se repite y lo que cambia es la asignación para el UpPTS, que cambia de 1 símbolo a 2, pero como ya se mencionó, las asignaciones con pocos símbolos no aportan REs al throughput.

Sin embargo si se consideran las asignaciones de DwPTS de tres símbolos ya que para el índice TDD uno, dicha asignación genera un throughput simétrico entre los enlaces, aunque hay desperdicio de elementos disponibles para datos.

Tabla 7.1 Resultados de throughput para el sistema de 3 MHz.

	Indice S.E.	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
Indice TDD											
1	MCS = 9	0.7701	0.7701	0.7701	0.7701	0.7701	0.9633	1.2342	1.2754	1.322	1.3586
6	MCS = 9	0.9604	0.9604	0.9604	0.9604	0.9604	0.7064	0.9816	1.0255	1.0695	1.1061
Indice S.E.		0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
Indice TDD											
1	MCS = 28	3.0676	3.0676	3.0676	3.0676	3.0676	3.8375	4.9164	5.0913	5.2663	5.4121
6	MCS = 28	3.8258	3.8258	3.8258	3.8258	3.8258	2.8139	3.9104	4.0853	4.2603	4.4061
		Throughput enlace ascendente [Mbps]					Throughput enlace descendente [Mbps]				

Tabla 7.2 Resultados de throughput para el sistema de 20 MHz

	Indice S.E.	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
Indice TDD											
1	MCS = 9	5.3407	5.3407	5.3407	5.3407	5.3407	6.2264	8.032	8.3248	8.6146	8.8616
6	MCS = 9	6.5704	6.5704	6.5704	6.5704	6.5704	4.5604	6.4948	6.7788	7.0716	7.3156
Indice S.E.		0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
Indice TDD											
1	MCS = 28	21.2751	21.2751	21.2751	21.2751	21.2751	24.8035	31.9963	33.1627	34.5291	35.3011
6	MCS = 28	26.174	26.174	26.174	26.174	26.174	18.1667	25.8727	27.0041	28.1795	29.1425
		Throughput enlace ascendente [Mbps]					Throughput enlace descendente [Mbps]				

De las tablas anteriores es importantes resaltar que el throughput de enlace ascendente se mantiene constante independientemente del índice de configuración que tenga la subtrama especial siempre y cuando el índice TDD no cambie. Por otro lado, a pesar de que el índice TDD uno, en combinación con el índice cero de la subtrama especial, generan un throughput bastante aceptable en cuanto a la simetría, no es el valor óptimo ya que dicha combinación desperdicia recursos en las subtramas especiales.

En contraste, al utilizar el índice TDD seis en combinación con el índice cuatro de la subtrama especial, se logra un throughput bastante simétrico, que además desperdicia el mínimo de recursos. Por consiguiente este es el caso sobre el cual se implementaron los codecs de voz.

7.3 Resultados para el canal de 3 MHz.

A) Parámetros considerados para el sistema de 3 MHz.

Tabla 7.3 Parámetros del sistema para un canal de 3 MHz

Índice de configuración TDD 6	DL/UL = 5/5
Índice de configuración de subtrama especial 4	DwPTS/GP/UpPTS = 12/1/1
Ancho de banda del sistema	3 MHz
Índice de MCS	9
Índice de MCS	28

B) Llamadas admitidas en un canal de 3 MHz con MCS = 9.

En las figuras de la 7.1 y 7.2 se muestra el número máximo de UEs a los que se les asignan recursos para la realización de una llamada para los enlaces ascendente y descendente respectivamente cuando se emplea el índice MCS 9, es decir modulación QPSK y una codificación de 0.61. En ambas figuras se muestran todos los codecs empleados y es evidente que ningún codec sobrepasa el throughput máximo de 960.4 Kbps para el enlace ascendente y de 1.1061 Mbps para el enlace descendente.

Por otro lado es claro que la cantidad de llamadas depende en buena parte del códec que se este utilizando, pues la cantidad de llamadas para el enlace ascendente van desde 8 (G.726 con data rate de 32 y 24 Kbps), 9 (G.728 y G.711 con data rate de 16 y 64 Kbps respectivamente), 17 (G.722.2 con data rate de 12.85 Kbps), 19 (G.729 con data rate de 8 Kbps), 29 (AMR con data rate de 12.2 Kbps), 47 (G.723.1 con data rate de 6.4 Kbps) y 50 para el códec G.723.1 con un data rate de 5.3 Kbps.

Nótese que en el caso de los codecs G.726 que generan un data rate de 32 Kbps y 24 Kbps, ambos menores que el data rate de 64 Kbps generado por el códec G.711, logran un máximo de 8 llamadas en el enlace ascendente, es decir una llamada menos que con el G.711. La razón de esto es que el intervalo de muestreo de los codecs G.726 es de 5 ms, la mitad del intervalo de muestreo del G.711 (10 ms, véase tabla 5.3 del capítulo cinco), lo que provoca que mientras el códec G.711 cada 10 ms encapsula un paquete de voz con sus 80 bytes de carga y sus 40 bytes de encabezado RTP/UDP/IP, los codecs G.726 cada 5 ms encapsulen un paquete de voz con 20 y 15 bytes de carga para cada caso, y sus respectivos 40 bytes de encabezado RTP/UDP/IP. En otras palabras, mientras que el G.711 usa un encabezado de 40 bytes cada 10 ms, en el mismo tiempo, los codecs G.726 usan el mismo encabezado de 40 bytes dos veces, es decir, en 10 ms usan un encabezado total de 80 bytes.

Lo anterior repercute en la tasa en bps que genera cada codec en la capa física, pues mientras el G.711 genera 105.6 Kbps encapsulando cada 10 ms, los codecs G.726 generan 115.2 Kbps y 107.2 Kbps (32 y 24 Kbps respectivamente), encapsulando cada 5 ms, es decir empujan el encabezado RTP/UDP/IP dos veces en 10 ms.

Debido a esto, aunque el data rate de los codecs G.726 es menor al G.711 por ejemplo, no se tiene ningún tipo de ganancia en capacidad de llamadas. Sin embargo si el sistema hace uso completo de la subcapa PDCP e implementa el compresor de encabezados ROHC, que reduce el encabezado RTP/UDP/IP de los 40 bytes a únicamente 2 o 3 bytes, entonces al usar los codecs G.726 habrá una notable ganancia en la capacidad de llamadas.

El comportamiento descrito arriba, aplica en todo caso, es decir; sin importar el ancho de banda del sistema ni que índice de MCS se esté ocupando, por lo que se verá un comportamiento similar para el índice MCS 28 de 3 MHz y para ambos casos del sistema de 20 MHz.

Aunque la cantidad de llamadas admitidas en el enlace descendente es mayor, el mecanismo de scheduling de LTE acepta las peticiones de los UEs, siempre y cuando se le puedan asignar recursos tanto en el enlace ascendente como para el descendente, por lo que la cantidad máxima de llamadas admitidas siempre estará limitada por el throughput de enlace ascendente.

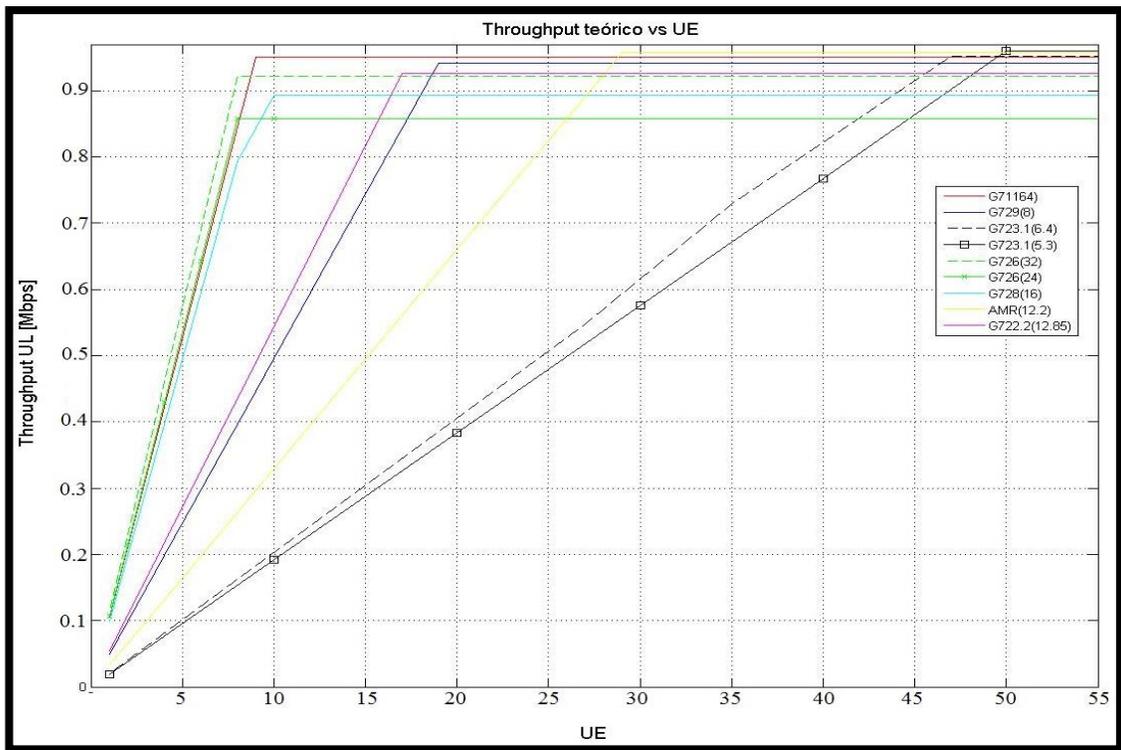


Figura 7.1 Llamadas admitidas en el UL.

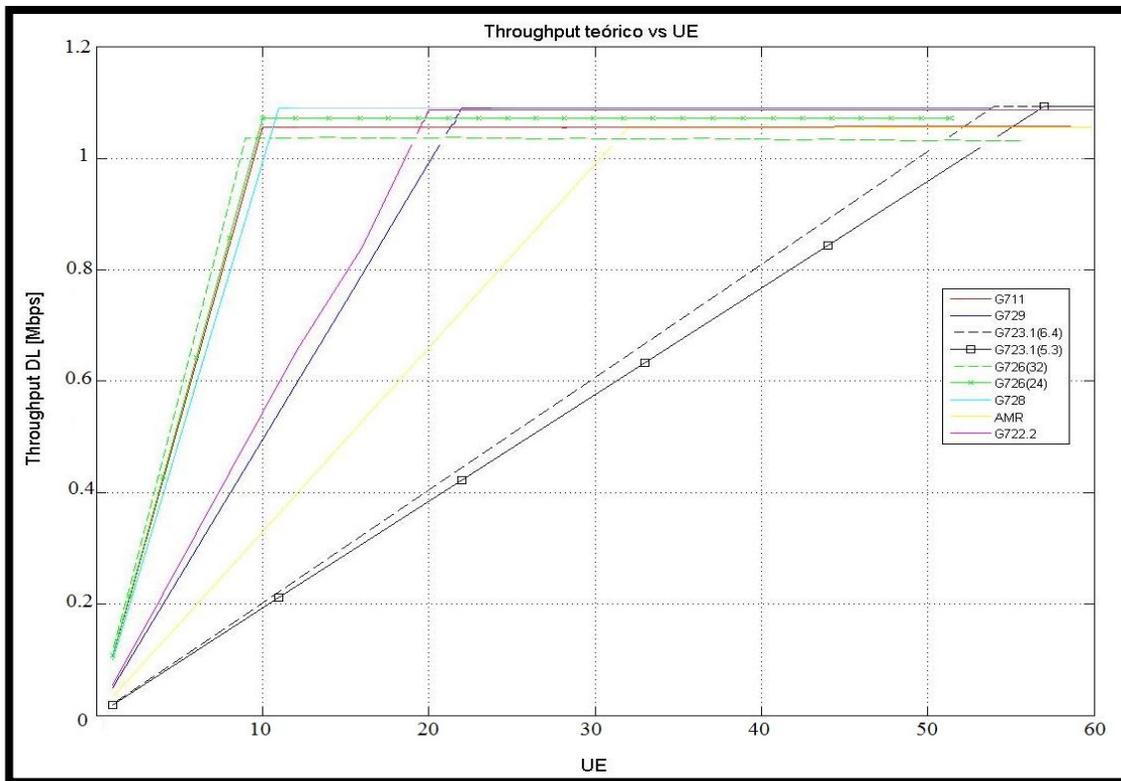


Figura 7.2 Llamadas admitidas en el DL.

C) Llamadas admitidas para un canal de 3 MHz y MCS = 28.

Para este caso, en las figuras 7.3 y 7.4 muestran las llamadas admitidas para los nueve codecs empleados en los enlaces ascendente y descendente respectivamente. Aquí se ha empleado el índice MCS 28, es decir modulación 64-QAM y una tasa de codificación de 0.81.

La cantidad de tráfico que genera el número de llamadas admitidas de cada códec nunca sobrepasa el throughput máximo de enlace ascendente (3.8258 Mbps) ni el de enlace descendente (4.4061 Mbps). Puesto que el throughput se ha incrementado debido a la modulación y codificación empleada, también se han incrementado el numero de llamadas posibles. Así, dicha cantidad va desde 33 (G.726 con data rate de 32 Kbps), 35 (G.726 con data rate de 24 Kbs), 36 (G.711 con data rate ed 64 Kbps), 38 (G.728 con data rate de 16 Kbps), 70 (G.722.2 con data rate de 12.85 Kbps), 77 (G.729 con data rate de 8 Kbps), 115 (AMR con data rate de 12.2 Kbps), 188 (G.723.1 con data rate de 6.4 Kbps) y hasta 199 (G.723.1 con data rate de 5.3 Kbps).

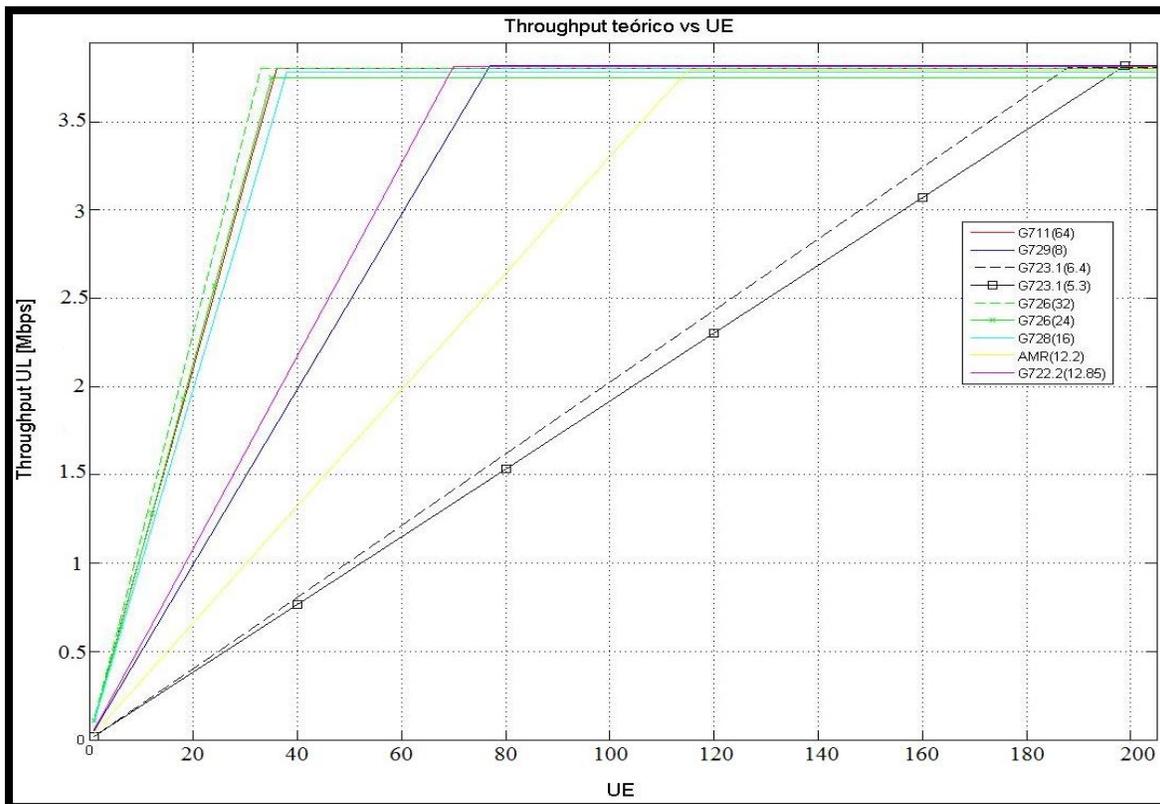


Figura 7.3 Llamadas admitidas en UL.

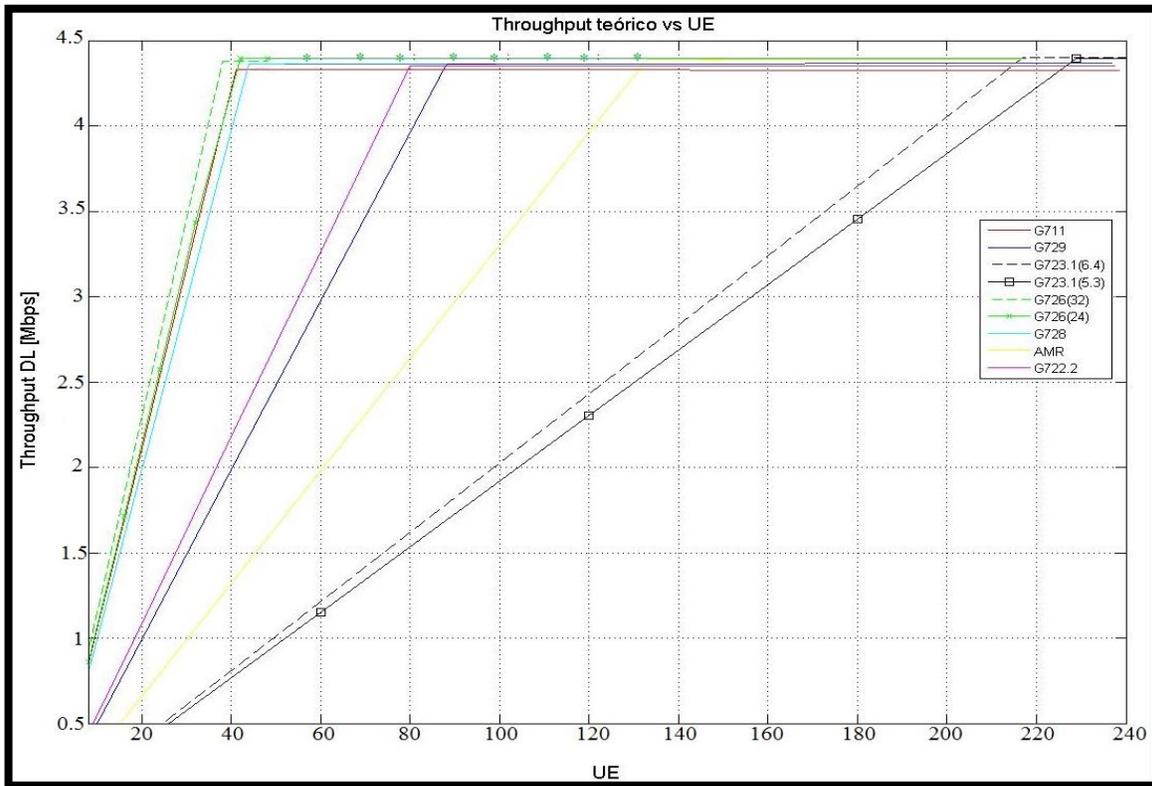


Figura 7.4 Llamadas admitidas en el DL.

Si se hubiera tomado como base el índice TDD 1 (UL/DL/S = 4/4/2) en conjunto con el índice de configuración 0 de subtrama especial (DwPTS/GP/UpPTS = 3/10/1) que generan un throughput de 3.0676 Mbps y de 3.8375 Mbps para los enlaces ascendente y descendente respectivamente. Los recursos hubieran alcanzado para admitir únicamente 56 y 70 llamadas para el enlace ascendente y descendente respectivamente, lo que demuestra que el índice TDD 6 y el índice de configuración 4 de subtrama especial es mas eficiente.

La información antes descrita, se resume en las tablas 7.4 y 7.5 para los casos donde se emplea el índice MCS 9 y 28 respectivamente.

Tabla 7.4 Throughput y llamadas admitidas para MCS = 9 y 3 MHz

	Códec VoIP	Data rate [Kbps]	Tasa LTE PHY [Kbps]	Núm. Llamadas UL/DL	
MCS₁ = 9	G.711	64	105.6	9/10	Throughput UL/DL = 0.9604/1.1068 Mbps
	G.729	8	49.6	19/22	
	G.723.1	6.4	20.26	47/54	
	G.723.1	5.3	19.2	50/57	
	G.726	32	115.2	8/9	
	G.726	24	107.2	8/10	
	G.728	16	99.2	9/11	
	AMR	12.2	33	29/32	
	G.722.2	12.8	54.4	17/20	

Tabla 7.5 Throughput y llamadas admitidas para MCS = 28 y 3 MHz

	Códec VoIP	Data rate [Kbps]	Tasa LTE PHY [Kbps]	Núm. Llamadas UL/DL	
MCS₁ = 28	G.711	64	105.6	36/41	Throughput UL/DL = 3.8258/4.4061 Mbps
	G.729	8	49.6	77/88	
	G.723.1	6.4	20.26	188/217	
	G.723.1	5.3	19.2	199/229	
	G.726	32	115.2	33/38	
	G.726	24	107.2	35/41	
	G.728	16	99.2	38/44	
	AMR	12.2	33	115/133	
	G.722.2	12.85	36	70/80	

7.4 Validación del modelo teórico para el canal de 3 MHz.

Para llevar a cabo la validación que ratifique la adecuada implementación del modelo teórico del capítulo seis, se usó el software especializado en redes OPNET modeler, del cual se tiene licencia de. Los parámetros introducidos al software se ve en la tabla 7.6.

Tabla de 7.6 Parámetros de OPNET modeler

Índice de configuración TDD 6	DL/UL = 5/5
Índice de configuración de subtrama especial 4	DwPTS/GP/UpPTS = 12/1/1
Ancho de banda del sistema	3 MHz
Índice de MCS	28
Tiempo de simulación	20 s
Potencia de transmisión eNodeB	10 [W] y 1 [W]
Potencia de transmisión UE	0.015 [W]
Retraso máximo (End to End Delay)	150 [ms]

La red LTE construida para la validación del modelo teórico se aprecia en la figura 7.5, donde aparece la topología de la red.

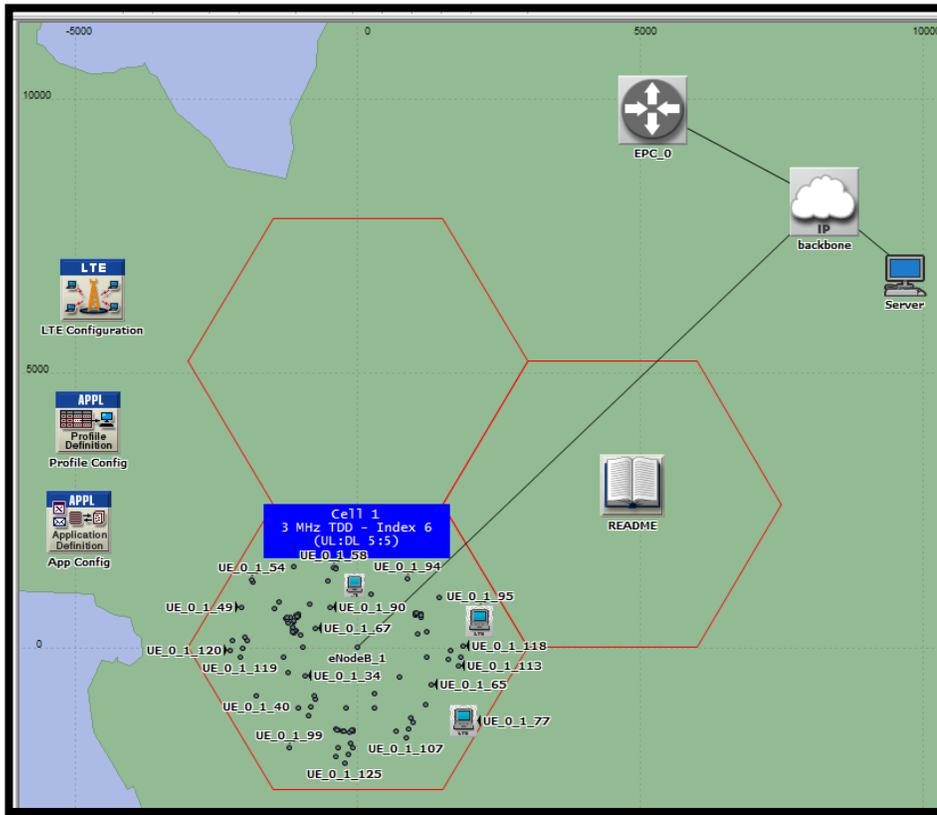


Figura 7.5 Topología de red LTE.

Como se aprecia, al centro de la celda se ubica el eNodeB, aunque hay dibujadas un par de celdas mas, en ellas no hay ningún elemento de red, por lo que no se presenta ningún problema de interferencia.

El eNodeB se conecta al EPC mediante un enlace de fibra optica cuya velocidad es de 155.52 [Mbps] equivalente a una señal OC-3 [36]. El EPC se conecta a su vez con un servidor de voz externo que cumple con la función de responder a los UEs con la misma cantidad de tráfico que recibe de ellos a través del EPC. Lo anterior simula una llamada externa que realiza un UE a otro UE que se encuentra en una celda o zona diferente de donde se inicia la llamada. Los iconos LTE-Configuration, Profile-Config y App-Config, son elementos en los cuales se manipulan parámetros como el tiempo en que los UEs comienzan a generar tráfico, cuanto dura dicha transmisión, y características básicas del sistema, como ancho de banda, índice TDD, etc..

Particularmente dentro del icono App-Config, se indica que códec de voz se va usar para la simulación, puesto que de acuerdo a las especificaciones de la 3GPP la mejor opción para la transmisión de vos es el códec AMR (12.2 Kbps). Desafortunadamente OPNET modeler no contiene este códec, aunque si contiene el códec G.722.2 (12.85 Kbps) que vendria siendo el códec mas parecido al AMR. Esta es la razón por la cual se incluyó dicho códec en los cálculos mostrados anteriormente. Los resultados arrojados por OPNET modeler se observan en las figuras 7.6, 7.7, 7.8 y 7.9.

En primera instancia, la figura 7.6 contiene información sobre el End to End Delay y como se va incrementando conforme la cantidad de UEs que entran al la red aumenta. Cuando el valor de UEs admitidos llega a 70, el End to End Delay sobrepasa los 150 ms, por lo tanto, el valor máximo de UEs a los que es posible asignarles recursos para sus respectvas llamadas es 69. Comparando este valor con el modelo teórico, para el cual, donde tenemos los mismo parámetros el máximo de llamadas para G.722.2 fue de 70. Lo cual es una aproximación bastante aceptable. Una vez que se sobrepasan los 70 usuarios, como se aprecia, el End to End Delay se incrementa de forma exponencial.

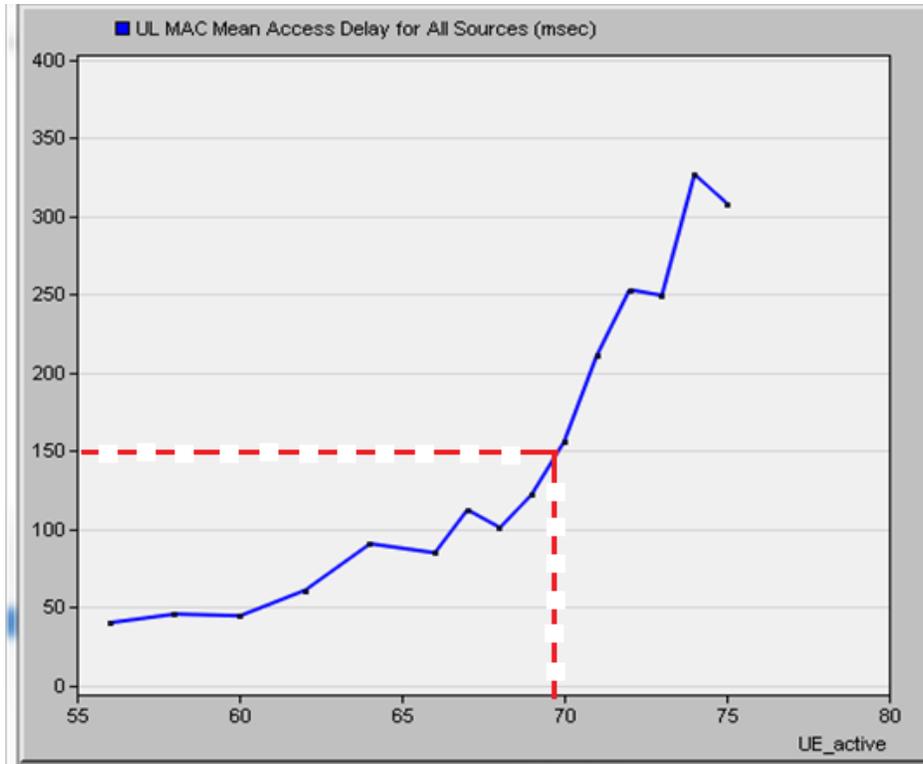


Figura 7.6 End to End Delay vs UEs activos.

En seguida, la figura 7.7 muestra el throughput que se genera conforme la cantidad de UEs incrementa. En ningun momento se sobrepasa el límite de 3.8258 Mbps calculado de forma teórica.

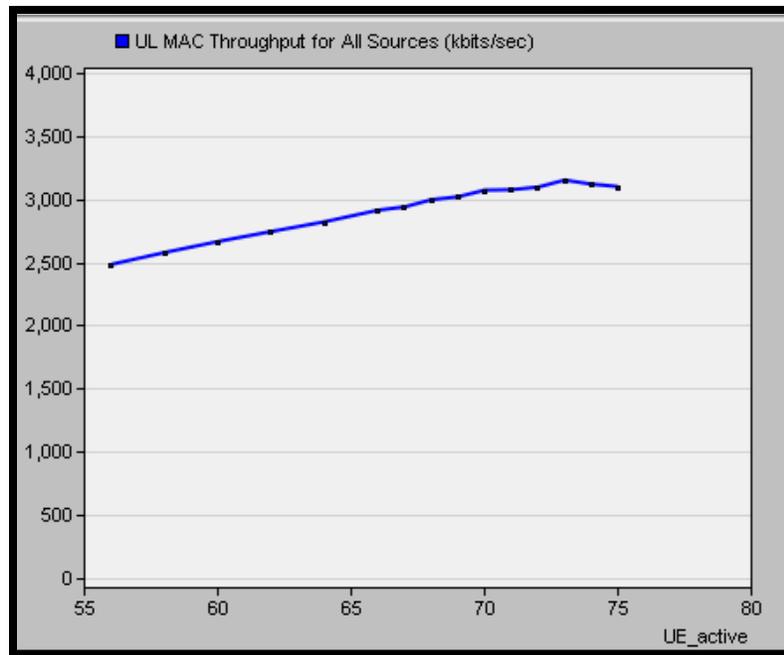


Figura 7.7 Throughput generado según se agreguen UEs.

Posteriormente las figuras 7.8 y 7.9 muestran el porcentaje de utilización de los canales físicos PUSCH y PDSCH respectivamente.

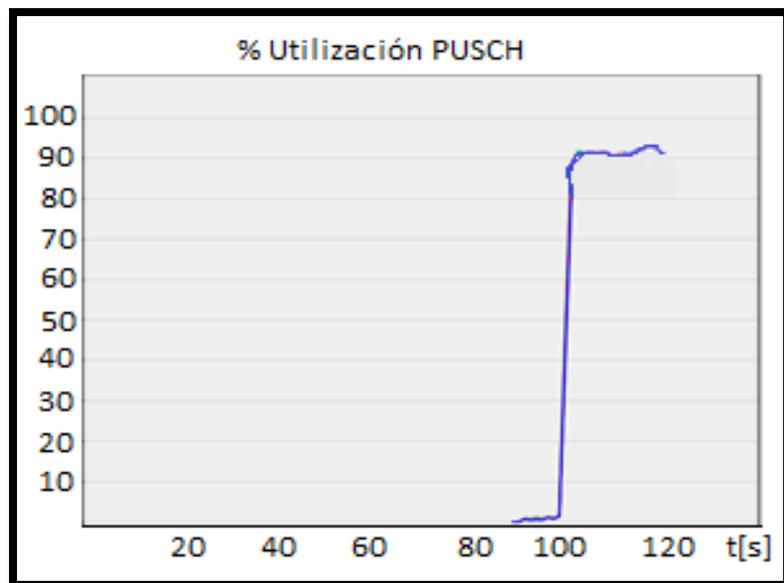


Figura 7.8 Porcentaje de utilización del canal PUSCH.

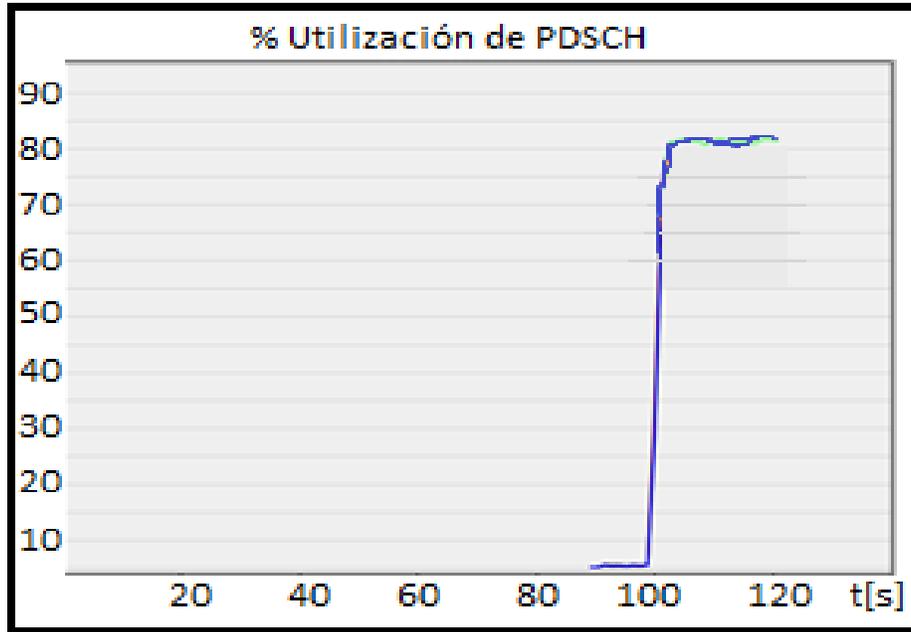


Figura 7.9 Porcentaje de utilización del canal PDSCH.

Las dos potencias del eNodeB mencionadas en la tabla 7.6 (10 y 1 Watts) se consideran para realizar una comparación de las distancias a las que se debe encontrar un UE de la estación base, si desea emplear el índice MCS 9 o 28. Para entender mejor este punto, el diagrama mostrado en la figura 7.5 indica algunos de los valores más significativos de code rate y su respectiva modulación.

En el diagrama, para cada code rate se requiere una determinada SNR, mientras más alto sea el code rate, se requiere de una SNR más grande, lo que se logra si el UE se acerca de forma importante a la estación base. Por otro lado, es importante resaltar que para hacer uso de un determinado índice MCS habrá una distancia mínima y máxima entre el UE y el eNode B. Estas distancias están en función de la SNR necesaria para asegurar que un UE utilice un determinado índice MCS, en particular para el índice MCS 9 se requieren los valores de 8.2 dB como mínimo y 10 dB máximo. Estos valores se logran cuando el UE está a una distancia de 7,275 [m] y 6550 [m] respectivamente.

Por otro lado para poder hacer uso de la mejor modulación y la codificación más alta (índice MCS 28), únicamente se requiere de una SNR mínima, cualquier valor que esté por encima de este valor asegura que el UE hace uso del índice MCS 28.

De acuerdo a la tabla 3.2 del capítulo tres, la tasa de codificación mas alta es de 0.93, pero es únicamente un valor teórico ya que ningún UE puede procesar la información a estas velocidades, por lo que mediante procesos ACK/NACK y HARQ, se utiliza la tasa de codificación anterior mas alta, es decir 0.81. Para alcanzar este valor, requeremos al menos 22.8 dB mismos que se logran a una distancia de 3500 [m]. Las distancias mencionadas se obtienen si el eNodeB opera con una potencia de 10 [W].

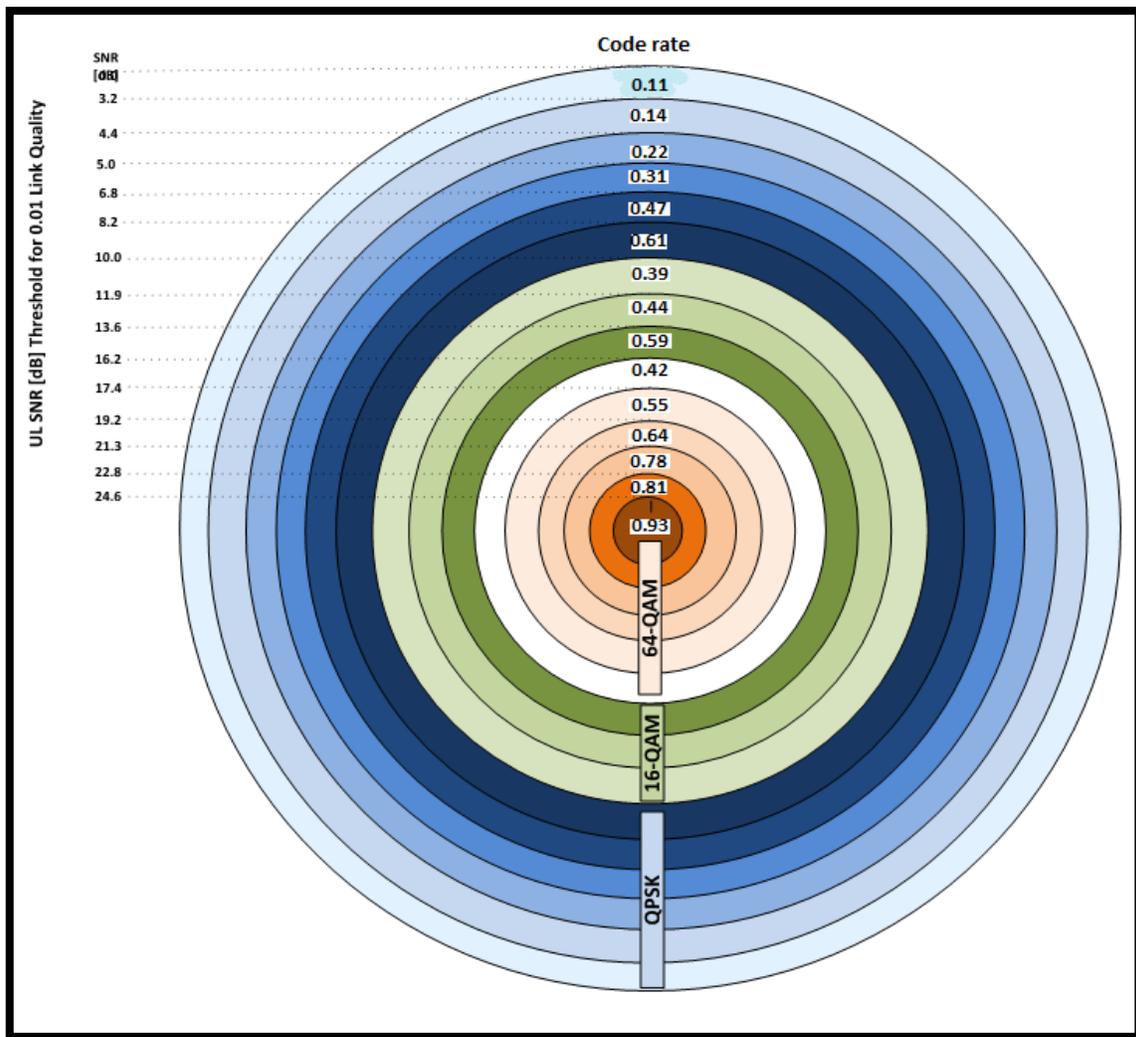


Figura 7.10 Diagrama de propagación con modulación y c.r

La tabla 7.7 resume la información anteriormente descrita, incluye las distancias para el índice MCS 9 y 28 tanto para la potencia de operación de 1 [W] y 10 [W] del eNodeB.

Tabla 7.7 Relación de distancia y SNR para los índices MCS 9 y 28

	Ptx = 10 [W]				Ptx = 1 [W]			
	SNRmin	Dmax [m]	SNRmax	Dmin [m]	SNRmin	Dmax [m]	SNRmax	Dmin [m]
MCS 9	8.2 dB	7,275	10 dB	6,550	8.2 dB	4,350	10 dB	3,950
MCS 28	22.8 dB	3,500	NA	NA	22.8 dB	2,000	NA	NA

Es evidente que a menor potencia de transmisión del eNodeB, el UE necesita estar mas cerca para poder hacer uso de un determinado índice MCS.

7.5 Resultados para el canal de 20 MHz

A) Parámetros considerados por el sistema de 20 MHz

Tabla 7.8 Parámetros del sistema para un canal de 20 MHz

Índice de configuración TDD 6	DL/UL = 5/5
Índice de configuración de subtrama especial 4	DwPTS/GP/UpPTS = 12/1/1
Ancho de banda del sistema	20 MHz
Índice de MCS	9
Índice de MCS	28

B) Llamadas admitidas por un canal de 20 MHz y MCS = 9

Las figuras de la 7.11 y 7.12 muestran que el throughput máximo para los enlaces ascendente y descendente, de 6.5704 Mbps y 7.3156 Mbps respectivamente, nunca son sobrepasados por el tráfico generado por los UEs cuando generan sus llamadas. La cantidad de llamadas admitidas va desde 57 (G.726 con un data rate de 32 Kbps), 61 (G.726 con un data rate de 24 Kbps), 62 (G.711 con un data rate de 64 Kbps), 66 (G.728 con un data rate de 16 Kbps), 120 (G.722.2 con un data rate de 12.85 Kbps), 132 (G.729 con un data rate de 8 Kbps), 197 (AMR con un data rate de 12.2 Kbps), 324 (G.723.1 con un data rate de 6.4 Kbps) y 342 con el códec G.723.1 con un data rate de 5.3 Kbps.

La diferencia entre el throughput de enlace ascendente y descendente se mantiene en proporción, independientemente del códec empleado.

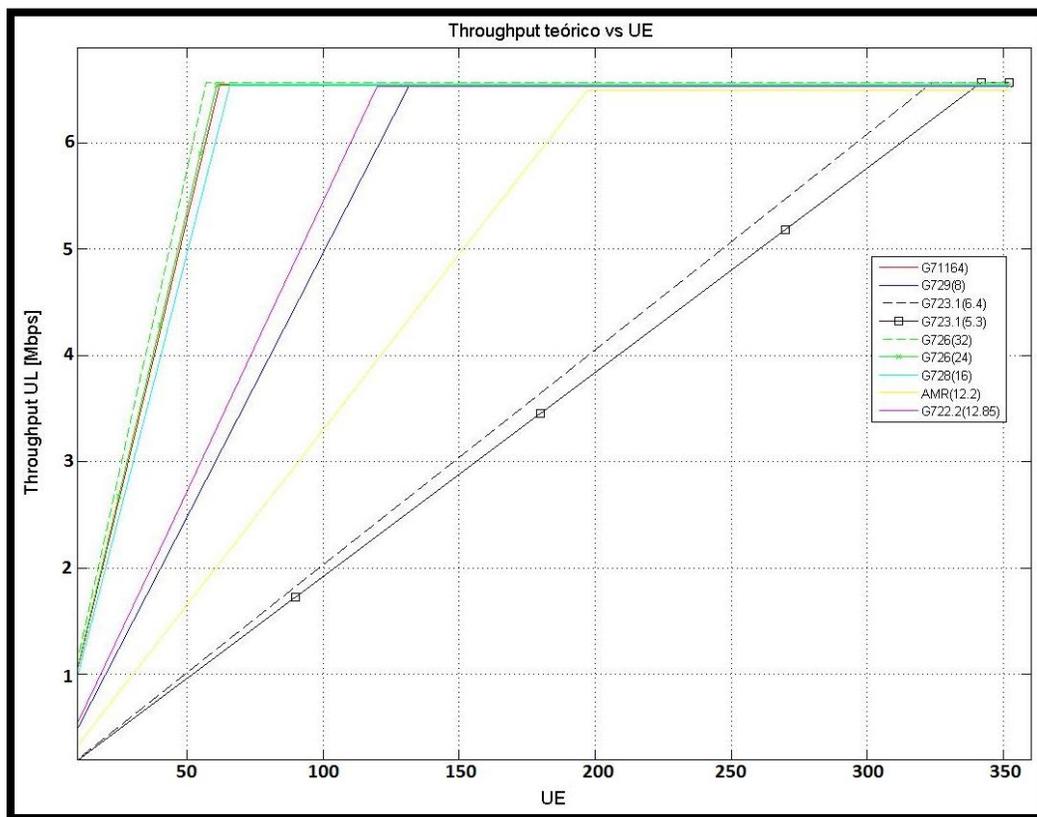


Figura 7.11 Llamadas admitidas en el UL.

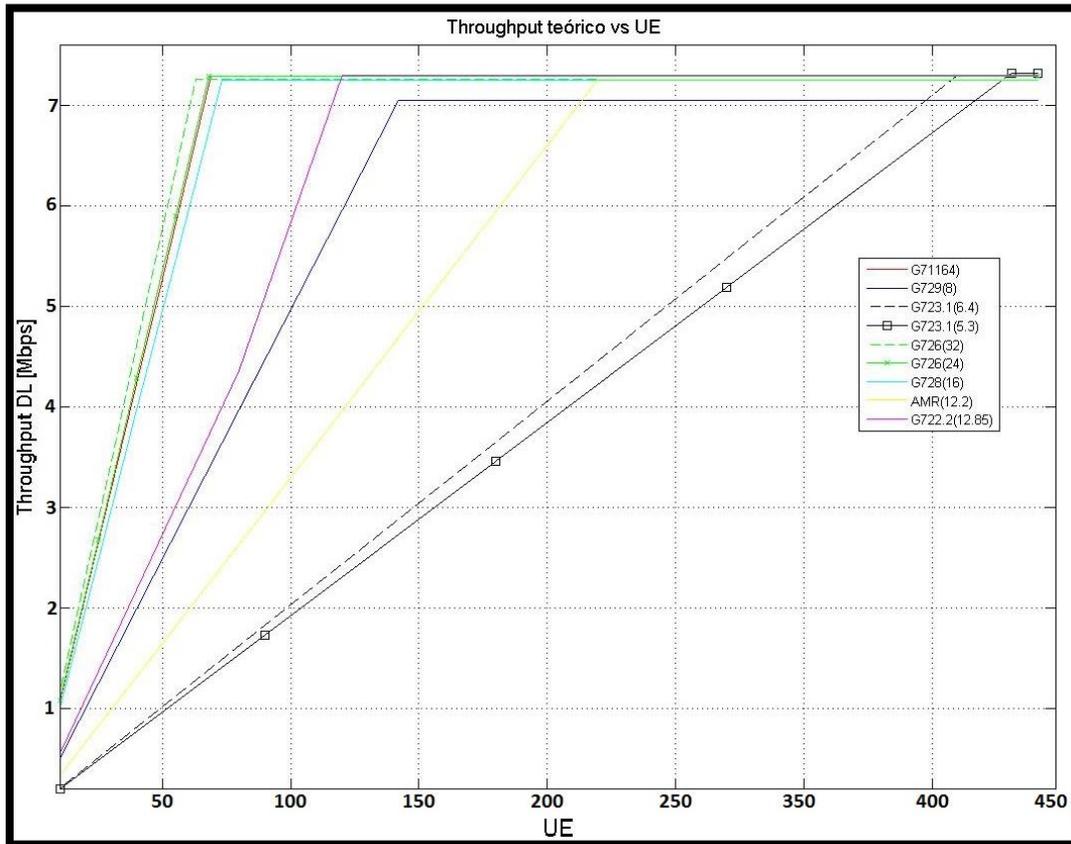


Figura 7.12 Llamadas admitidas en el DL.

Es claro que la cantidad de llamadas admitidas en el enlace descendente es mayor a la cantidad de llamadas admitidas en el enlace ascendente, esto es debido a que siempre en el enlace ascendente se pierde una mayor cantidad de recursos para fines de control y señalización, lo que tiene un alto impacto en los REs que pueden ser asignados para la transmisión de datos de usuario. En consecuencia el valor limitante será aquel que arroje el throughput del enlace ascendente.

C) Llamadas admitidas para un canal de 20 MHz y MCS = 28.

Las figuras 7.13 y 7.14 muestran el throughput máximo de enlace ascendente y descendente (26.174 Mbps y 29.1425 Mbps respectivamente) y la cantidad llamadas admitidas por la red LTE. Puesto que el sistema tiene un ancho de banda de 20 MHz y se está empleando el índice de MCS 28 (64QAM y c.r. = 0.81), se tiene el sistema con la mayor prestación en términos de REs para asignar a los usuarios. La diferencia entre los máximos alcanzados por los enlaces ascendente y descendente se mantiene en proporción independientemente de el codec de voz del que se trate. La cantidad de llamadas varía desde 247 (G.711 con data rate de 64 Kbps), 527 (G.729 con data rate de 8 Kbps), 1291 (G.723.1 con data rate de 6.4 Kbps), 1,363 (G.723.1 con data rate de 5.3 Kbps), 227 (G.726 con data rate de 32 Kbps), 244 (G.726 con data rate de 24 Kbps), 263 (G.728 con data rate de 16 Kbps), 788 (AMR con data rate de 12.2 Kbps) y 481 para el códec G.722.2 que tiene un data rate de 12.85 Kbps.

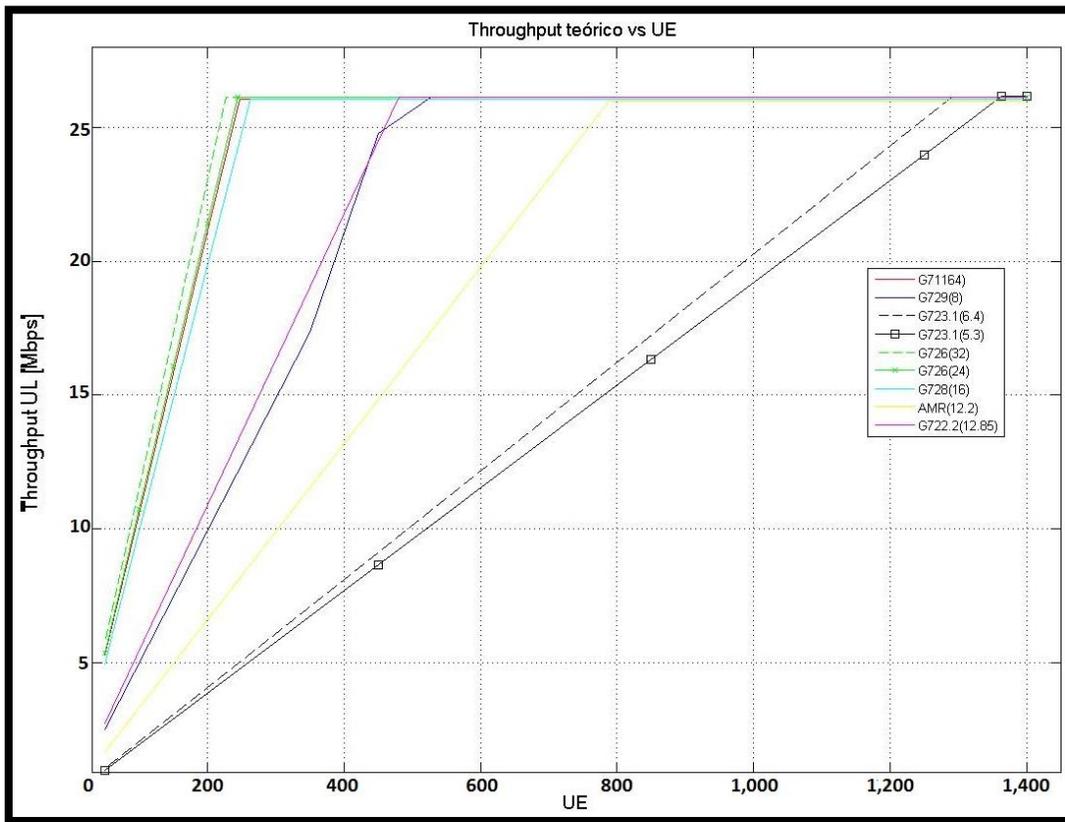


Figura 7.13 Llamadas admitidas en el UL.

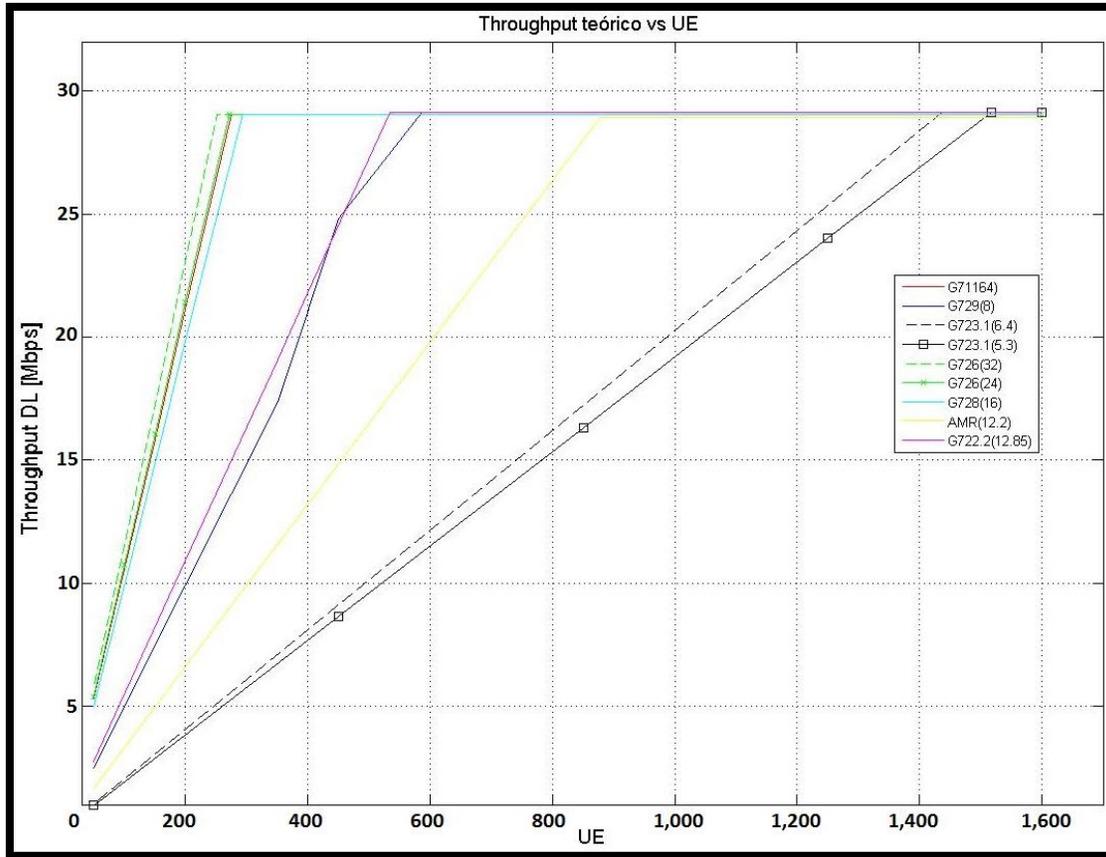


Figura 7.14 Llamadas admitidas en el DL.

La información descrita en las figuras anteriores se resume en el siguiente par de tablas, donde aparecen las llamadas admitidas para ambos enlaces y para cada caso de índice MCS , así como el códec empleado y el data rate que cada uno genera.

Tabla 7.9 Throughput y llamadas admitidas con MCS = 9 y 20 MHz

	Códec VoIP	Data rate [Kbps]	Tasa LTE PHY	Núm. Llamadas UL/DL	
Índice MCS = 9	G.711	64	105.6	62/69	Throughput UL/DL = 6.5704/7.3156 Mbps
	G.729	8	49.6	132/142	
	G.723.1	6.4	20.26	324/360	
	G.723.1	5.3	19.2	342/381	
	G.726	32	115.2	57/63	
	G.726	24	107.2	61/68	
	G.728	16	99.2	66/73	
	AMR	12.2	33	197/220	
	G.722.2	12.85	36	120/134	

Tabla 7.10 Throughput y llamadas admitidas con MCS = 28 y 20 MHz

	Códec VoIP	Data rate [Kbps]	Tasa LTE PHY	Núm. Llamadas UL/DL	
Índice MCS = 28	G.711	64	105.6	247/275	Throughput UL/DL = 26.174/29.1425 Mbps
	G.729	8	49.6	527/587	
	G.723.1	6.4	20.26	1,291/1,437	
	G.723.1	5.3	19.2	1,363/1,517	
	G.726	32	115.2	227/252	
	G.726	24	107.2	244/271	
	G.728	16	99.2	263/293	
	AMR	12.2	33	788/877	
	G.722.2	12.85	36	480/535	

7.6 Resumen final de resultados.

Como punto final de este capítulo, el presente apartado sintetiza la información recavada a lo largo de la elaboración de la tesis a través del modelo teórico propuesto y los cálculos que conllevan. En la tabla 7.9 se puede observar el throughput máximo alcanzado según el índice MCS (9 o 28), la cantidad de llamadas admitidas para cada códec, el data rate que cada códec genera tanto a nivel de la capa de IP como a nivel de la capa física de LTE, además se presentan tanto el caso del sistema de 3 MHz, como el del sistema de 20 MHz.

Tabla 7.11 Resumen final de resultados.

					BW = 3 MHz	BW = 20 MHz	
MCS _{INDEX} = 9	Códec	Data rate [Kbps]	Rate IP [Kbps]	Rate LTE PHY [Kbps]	Throughput = 0.9604/1.1061 Mbps	Llamadas UL/DL	
	G.711	64	96	105.6		9/10	62/69
	G.729	8	40	49.6		19/22	132/142
	G.723.1	6.4	17.06	20.26		47/54	324/360
	G.723.1	5.3	16	19.2		50/57	342/381
	G.726	32	96	115.2		8/9	57/63
	G.726	24	88	107.2		8/10	61/68
	G.728	16	80	99.2		9/11	66/73
	AMR	12.2	28.2	33		29/32	197/220
	G.722.2	12.85	44.85	54.45		17/20	120/134
					Throughput = 6.5704/7.3156 Mbps		
MCS _{INDEX} = 28	Códec	Data rate [Kbps]	Rate IP [Kbps]	Rate LTE PHY [Kbps]	Throughput = 3.8258/4.4061 Mbps	Llamadas UL/DL	
	G.711	64	96	105.6		36/41	247/275
	G.729	8	40	49.6		77/88	527/587
	G.723.1	6.4	17.06	20.26		188/217	1,291/1,437
	G.723.1	5.3	16	19.2		199/229	1,363/1,517
	G.726	32	96	115.2		33/38	227/252
	G.726	24	88	107.2		35/41	244/271
	G.728	16	80	99.2		38/44	263/293
	AMR	12.2	28.2	33		115/133	788/877
	G.722.2	12.85	44.85	54.45		70/80	480/535
					Throughput = 26.174/29.1425 Mbps		

CAPÍTULO 8

Conclusiones

8.1 Conclusiones finales.

En primera instancia, gracias a los resultados arrojados por el software OPNET MODELER, usado para realizar la validación del modelo teórico, se concluye que el mecanismo de scheduling implementado en el eNodeB, únicamente otorga recursos a un UE, si y sólo si, hay recursos suficientes para el UE tanto en el enlace ascendente como descendente. No es posible asignar recursos a un UE si el sistema únicamente tiene recursos en uno de los enlaces. Debido a esto, estimar la cantidad de UEs a los cuales se les puede dar soporte, siempre depende del throughput máximo que alcance el enlace ascendente, pues como se ve en la tabla 7.1, dicho throughput siempre es menor al del enlace descendente (por ejemplo 0.9604 Mbps y 1.1061 Mbps respectivamente, para el caso de 3 MHz y MCS =9).

En segunda instancia, el papel que juegan los canales PDCCH (enlace descendente) y PRACH (enlace ascendente) es de vital importancia para la determinación de los REs de datos, pues la cantidad que dichos canales ocupen, tienen un gran impacto en los REs de control que hay que considerar en los cálculos.

Por otro lado, se concluyó que cuando se realizan los cálculos empleando los índices de subtrama especial (independientemente del índice TDD) que asigna 3 símbolos al DwPTS (índices 0 y 5), no existe aportación de REs de datos al throughput. De hecho ocurre todo lo contrario, las subtramas especiales se descartan en los cálculos del throughput de enlace descendente, a pesar de que si quedan algunos REs libres después de que se han usado los REs de control.

Finalmente, el throughput de enlace ascendente siempre será inferior al throughput del enlace descendente, independientemente de que índices TDD y de subtrama especial se utilicen. Esto se debe a que en el enlace ascendente los mecanismos de control ocupan más recursos y además estos recursos se encuentran de forma contigua, es decir generalmente, los recursos ocupan ya sea PRBs completos o la totalidad de las subportadoras del sistema (aunque solo ocupen un símbolo). Lo anterior contrasta con los recursos ocupados para control del enlace descendente, pues están acomodados de forma más dinámica lo que permite que existan REs para datos entre los canales de control.

8.2 Visión a futuro.

LTE es únicamente el primer paso hacia un sistema mucho más completo y dinámico que sea capaz de lograr tasas de transmisión más altas (hasta 1 Gbps en el enlace descendente y 0.5 Gbps en el enlace ascendente), que sea propiamente llamado un sistema de cuarta generación o 4G. Dicho sistema recibe por nombre LTE Advanced y actualmente se encuentra en desarrollo.

Puesto que, de acuerdo a las publicaciones de la 3GPP y la UIT, LTE Advanced podrá hacer uso de un ancho de banda de hasta 100 MHz e implementar multiplexado espacial MIMO de 8x8, la capacidad que tendrá, en términos de resource elements (REs) sería en un cálculo rápido quedaría de la siguiente forma (utilizando el índice TDD 6 e índice de subtrama especial 4):

REs en 20 MHz UL ----- 53,856

REs en 20 MHz DL ----- 59,964

Si aplicamos una sencilla regla de tres para el caso de 100 MHz, entonces:

53,856 REs ----- 20 MHz UL

269,280 REs ----- 100 MHz UL

59,964 REs ----- 20 MHz DL

299,820 REs ----- 100 MHz DL

Si hacemos uso del índice MCS 28 (64QAM con c.r = 0.81), entonces se genera un throughput para enlace ascendente y descendente de la siguiente capacidad:

$$Th_{UL} = (269,280)(100)(6)(0.81) = 130.87 \text{ Mbps}$$

$$Th_{DL} = (299,820)(100)(6)(0.81) = 145.712 \text{ Mbps}$$

Recordemos que el factor “100” de la operación anterior es debido a que los REs indicados son cada 10 ms (valor de una trama), por lo que en un segundo tenemos 100 tramas. Ahora para realizar un ligero esbozo de las capacidades de LTE Advanced para soportar llamadas simultaneas, imaginemos los siguientes cuatro casos, en donde el códec empleado siempre será AMR (12.2 Kbps que genera una tasa de 33 Kbps a nivel de capa física en LTE) y donde el valor límite será el throughput de enlace ascendente.

a) Sin uso de ROHC de PDCP.

Para este sencillo caso, el cálculo de la capacidad de llamadas se aproxima de la forma en que se hizo durante el desarrollo de esta tesis, así tenemos que:

$$NumLlamadas = \frac{Th_{UL}}{AMR_{D.R.}} = \frac{130.87 \times 10^6}{33 \times 10^3} = 3,965 \text{ llamadas}$$

Si tomamos el valor de llamadas admitidas para un canal de 20 MHz (788 con AMR, tabla 7.11) y lo comparamos con el obtenido arriba, se aprecia un incremento de cinco veces lo logrado con un canal de 20 MHz, en efecto, LTE Advanced puede trabajar con anchos de banda de hasta 100 MHz, es decir cinco veces 20 MHz, por lo que la cantidad soportada se incrementa en proporción.

b) Empleando compresor ROHC.

Ahora, si al incremento de ancho de banda ofrecido por LTE Advanced, le añadimos el compresor ROHC que nos reduce el encabezado RTO/UDP/IP de 40 bytes a tan solo 3 bytes, entonces la tasa de transmisión a nivel de capa física de LTE es:

$$\begin{aligned} AMR_{LTEPHY} &= \frac{(carga \text{ AMR} + RTP/UDP/IP + PDCP/RLC /MAC) \times 8}{Intervalo \text{ muestreo}} \\ &= \frac{(30.5+3+12) \times 8}{20 \text{ ms}} = 18.2 \text{ Kbps} \end{aligned}$$

Por lo tanto, la cantidad de llamadas por LTE Advanced es:

$$NumLlamadas = \frac{Th_{UL}}{AMR_{D.R.}} = \frac{130.87 \times 10^6}{18.2 \times 10^3} = 7,190 \text{ llamadas}$$

Lo cual es el doble del caso a), ya que la tasa a nivel de capa física de LTE Advanced es prácticamente la mitad para este caso b).

c) Haciendo uso de ROHC y encapsulación.

Nos referimos por encapsulación al proceso de agrupar dos tramas de determinada duración en ms, para unirlos en un único paquete voz al cual se le agregan los encabezados RTP/UDP/IP una sola vez. Así al unir dos tramas de AMR, de 30.5 bytes y 20 ms de duración cada una, entonces a nivel de capa física tenemos:

$$AMR_{LTEPHY} = \frac{(30.5 + 30.5 + 3 + 12) \times 8}{40 \text{ ms}} = 15.2 \text{ Kbps}$$

En consecuencia la cantidad de llamadas admitidas sería:

$$NumLlamadas = \frac{Th_{UL}}{AMR_{D.R.}} = \frac{130.87 \times 10^6}{15.2 \times 10^3} = 8,609 \text{ llamadas}$$

d) Haciendo uso de ROHC, encapsulación y compresión de silencios.

A los procesos empleados en los incisos b y c, se le suma la supresión de silencios. Esto es, en una llamada común, en el 60% de la transmisión no hay datos propiamente de voz, sino silencio que ocupa ancho de banda. Al suprimir estas transmisiones de silencios, el sistema aumenta su capacidad, pues en el lapso donde van los silencios de una llamada, se pueden enviar los datos de otra llamada. Esta supresión se realiza durante la digitalización de la voz.

Así, la tasa generada por el códec AMR que habitualmente es de 12.2 Kbps, se reduce a 4.88 Kbps (12,200 x 0.4).

Y la carga en bytes que tendría el códec AMR sería de 12.2 bytes (30.5x0.4), en consecuencia y tomando en cuenta el uso de ROHC y la encapsulación, la tasa de transmisión de AMR a nivel de capa física es:

$$AMR_{LTEPHY} = \frac{(12.2 + 12.2 + 3 + 12) \times 8}{40 \text{ ms}} = 7.88 \text{ Kbps}$$

Y la cantidad de llamadas admitidas es:

$$NumLlamadas = \frac{Th_{UL}}{AMR_{D.R.}} = \frac{130.87 \times 10^6}{7.88 \times 10^3} = 16,607 \text{ llamadas}$$

Es claro que la capacidad de LTE Advanced es enorme y muy superior a LTE, al menos cinco veces. No olvidemos que LTE Advanced puede ser multiplexación espacial MIMO de hasta 8x8, lo sería un factor de incremento también.

Sin embargo, hay que resaltar que al emplear multiplexado espacial MIMO, la asignación de REs de control y señalización es diferente a la mostrada en esta tesis, por lo que el cálculo anterior solo es una ligera aproximación y tiene la intención de servir como referencia de lo que se puede lograr con LTE Advanced.

Otro aspecto importante que está incluido en LTE Advanced es el concepto de trabajar con estructuras celulares jerárquicas (macrocélulas, microcélulas y picocélulas) y las denominadas femtocélulas [2]. Las femtocélulas son una estación base en miniatura que podrían ser instaladas en los hogares, como un access point de WiFi. La comunicación adecuada entre las distas jerarquías podría determinar a un UE que tipo de célula utiliza, de acuerdo a su movilidad, con el fin de reducir al mínimo la cantidad de handovers que el UE deba realizar. Por otro lado, si se reduce la superficie a cubrir de la célula, se tiene un incremento en las prestaciones de los recursos, lo que se traduce en lograr las más altas de transmisión. [37]

Referencias.

- [1] <http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=information&rlink=imt-advanced&lang=en>
- [2] Agusti Comes Ramón, et.al. “LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles”. Fundación Vodafone. 2010
- [3] Dahlman Erik, et.al. “LTE/LTE advanced for Mobile Broadband”. Elsevier. 2011
- [4] Torrieri, Don. “Principles of spread-spectrum communications systems”. Springer, 2005
- [5] Holma Harri & Toskala Antti. “LTE for UMTS OFDMA & SC-FDMA Based Radio Access”. John Wiley & Sons. 2009
- [6] 3GPP. “ETSI TS 36.300 LTE: E-UTRA & E-UTRAN”. ETSI. 2009
- [7] 3GPP. “ETSI TS 36.410 LTE; E-UTRAN: S1 general aspects and principles”. ETSI. 2009
- [8] 3GPP. “TS 36.413 LTE: R-UTRA; S1 AP”. ETSI. 2009
- [9] 3GPP. “TS 29.061 3GPP PLMN and PDN”. 3GPP. 2005
- [10] 3GPP. “TS 36.420 E-UTRAN; X2 general aspects and principles”. 3GPP. 2007
- [11] Cox, Christopher. “An introduction to LTE, LTE Advanced, SAE and 4G Mobile Communications”. Wiley. 2012.
- [12] 3GPP. “ETSI TS 29.281: UMTS, LTE & GTP”. ETSI. 2009.
- [13] IETF. “RFC 4960: Streaming Control Transmission Protocol”. IETF. 2007.
- [14] Stremler, Ferrer G. “Introducción a los sistemas de comunicación”. Addison-Wesley. 1993
- [15] 3GPP. “ETSI TS 36.214: LTE; E-UTRAN Physical layer measurements”. ETSI. 2009
- [16] Jung Fu-Cheng & Yang Hu. “System and method of modulation and coding scheme adjustment for a LTE shared channel”. 2010
- [17] Ericsson. “LTE L12, Radio Network Functionality, Student Book”. Ericsson. 2011.
- [18] Khan, Farooq. “LTE for 4g mobile broadband”. Cambridge University Press. 2009.
- [19] IETF. “RFC 3095: Robust Header Compression”. IETF. 2001.

- [20] Dahlman, Erik et.al. “3G Evolution; HSPA and LTE for mobile broadband”. Elsevier. 2007
- [21] 3GPP. “TS 36.323; E-UTRA & PDCP protocol specification”. 3GPP. 2008
- [22] 3GPP. “ETSI TS 36.322; LTE, E-UTRA & RLC protocol specification”. 3GPP. 2008
- [23] 3GPP. “ETSI TS 36.321; LTE, E-UTRA & MAC protocol specification”. 3GPP 2008
- [24] Roke Solutions. “LTE MAC scheduler & radio resource scheduling”. Roke manor research. 2011
- [25] EETS. “Scheduling and DRX”. EETS Wireless networks. 2013
- [26] Sesia, Stefania, et.al. “LTE the UMTS Long Term Evolution”. Wiley. 2009
- [27] Furht, Borko & Ahson, Syed. “Long Term Evolution, 3GPP LTE radio and cellular technology”. CRC press. 2009.
- [28] Ergen, Mustafa. “Mobile Broadband, including LTE & WIMAX”. Springer. 2009.
- [29] 3GPP. “ETSI TS 23.203; Technical specification group services and system aspects, Policy and charging control architecture”. 3GPP. 2009
- [30] <http://superuser.com/questions/635810/which-one-voip-sip-audio-codec-should-i-choose-to-high-quality-calls>
- [32] http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/voice/h323/14069-codec-complexity.html?referring_site=bodynav
- [33] Ivanov, Angel. TDD-LTE & FDD LTE, a basic comparison”. Ascom. 2012.
- [34] Vebytra Sys team paper: LTE TDD the preferd choose for mobile broad band
- [35] http://paul.wad.homepage.dk/LTE/lte_resource_grid.html
- [36] Tektroniks. “Synchronous Optical Network SONET”. The International Engineering Consortium.
- [37] <http://www.qualcomm.com/solutions/wireless-networks/technologies/lte-advanced>

Apéndice A. Lista de Acrónimos.

3GPP Third Generation Partnership Project

A

ACK Acknowledged

ADSL Asymmetric Digital Subscriber Line

AMPS Advanced Mobile Phone System

AMR Adaptive Multi Rate codec

AN Access Network

ARP Allocation and Retention Priority

ARQ Automatic Repeat Request

AWGN Additive White Gaussian Noise

B

BCH Broadcast Channel

BCCH Broadcast Control Channel

C

CCCH Common Control Channel

CDMA Code Division Multiple Access

CFI Channel Format Indicator

CN Core Network

COFETEL Comisión Federal de Telecomunicaciones

CSD Circuit Switched Domain

CQI Channel Quality Identifier

D

D-AMPS Digital-Advanced Mobile Phone System

DCI Downlink Control Information

DCCH	Dedicated Control Channel
DM-RS	Demodulation Reference Signals
DL	Downlink o enlace descendente
DL-SCH	Downlink Shared Channel
DTCH	Dedicated Traffic Channel
DwPTS	Downlink Pilot Signal

E

EMM	EPS Mobility Management
eNB	eNode B estación base de LTE
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
E-RAB	E-UTRAN Radio Access Bearer

F

FDD	Frequency Division Duplexing
FEC	Forward Error Correction
FTP	File Transfer Protocol

G

GBR	Guaranteed Bit Rate
GERAN	GSM EDGE Radio Access Network
GP	Guard Period
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile communications
GTP	GPRS Tunneling Protocol

H

HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
------	---------------------------------

HSPA High Speed Packet Access

I

IMT-2000 International Mobile Telecommunications 2000

IMS IP Multimedia Subsystem

IP Internet Protocol

ISI Inter Symbol Interference

L

LOS Line Of Sight

LTE Long Term Evolution

M

MAC Media Access Control

MATLAB Matrix Laboratory

MBMS Multicast/Broadcast Multimedia System

MCH Multicast Channel

MCCH Multicast Control Channel

MIMO Multiple Input Multiple Output

MME Mobility Management Entity

MOS Mean Opinion Square

MTCH Multicast Traffic Channel

N

NACK Negative Acknowledgment

Non GBR Non-Guaranteed Bit Rate

O

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiple Access

OPNET Optimized Network Engineering Tools

P

PBCH	Physical Broadcast Channel
PCCH	Paging Control Channel
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDN	Packet Data Network
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
P-GW	Packet data network Gate Way
PMCH	Physical Multicast Channel
PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel
PRB	Physical Resource Block
PRACH	Physical Random Access Channel
PSD	Packet Switched Domain
P-SCH	Primary Synchronization Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel

Q

QoS	Quality Of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation

R

RACH	Random Access Channel
RE	Resource Element
RLC	Radio Link Control
RRC	Radio Resource Control
ROHC	Robust Header Compression

RS	Reference Signal
RTP	Real time Transport Protocol
RX	Nodo receptor
S	
S-CH	Synchronization Channel
SC-OFDMA	Single Carrier-OFDMA
SCTP	Stream Control Transmission Protocol
S-GW	Service Gate Way
SIM	Subscriber Identity Module
SMS	Short Message Service
SNR	Signal to Noise Ratio
SN	Sequence Number
S-SCH	Secondary Synchronization Channel
SRS	Sounding Reference Signals
T	
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Duplexing Division
TEID	Tunnel End point Identifier
TF	Transport Format
TFT	Traffic Format Template
TM	Transparent Mode
TX	Nodo transmisor
U	
UE	User Equipment
UICC	Universal Integrated Circuit Card
UDP	User Datagram Protocol

UIT	Union International of Telecommunications
UL	Uplink o enlace ascendente
UL-SCH	Uplink Shared Channel
UM	Unacknowledgement Mode
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UpPTS	Uplink Pilot Signal
UTRAN	UMTS-Terrestrial Radio Access Network
V	
VoIP	Voice over Ip
VoLGA	Voice over LTE via General Access
VoLTE	Voice over LTE
W	
WiMAX	Worldwide Interoperability Microwave Access
Wifi	Wireless Fidelity (IEE 802.11)
W-LAN	Wireless Local Area Network

Apéndice B. Código MATLAB

```
fprintf(1, '          Cálculo del throughput para LTE con estructura de
trama tipo TDD');
fprintf(1, '\n\n\t\t\t\t\tAncho de banda de 3 MHz y PDCCH de dos simbolos');
tddindex=input('\n\nIntroduce el índice de configuración TDD (0-6): ');
ssindex=input('\n\nIntroduce el índice de configuración de la subtrama
especial (0-8): ');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
elseif((tddindex==6)&&(ssindex==4))
    fprintf(1, '\n\nDL:UL = 5:5');
    fprintf(1, '\n\nDwPTS/GP/UpPTS = 12/1/1 \n\n ');
    dwpts=12;
    gp=1;
    uppts=1;
    subul=5;
    subdl=3;
    ss=2;
    %REs en las subtramas de DL es constante
    b=5790;
    %%%%%%%%%Cuenta de REs de las subtramas especiales%%%%%%%%
    totresss=180*dwpts*ss;
    pdcchss=360*ss;
    psch=72*ss;
    rsss=6*15*ss;
    c=totresss-pdcchss-psch-rsss;
    %%%%%%%%%Cuenta total para DL
    d=b+c;
    %%%%%%%%%Cuenta de REs para UL%%%%%%%%
    pusch=7872;

    disp('El numero total de REs disponibles para datos en DL es: ');
    disp(d);
    disp('El número total de REs disponibles para datos en UL es: ');
    disp(pusch);
    m=input('Introduce el índice de modulación: \n ');
    thdl=d*m*100;
    thul=pusch*m*100;
    disp('El th para DL sin code rate es de: ');
    disp(thdl);
    disp('El th para UL sin code rate es de: ');
    disp(thul);
    %% Seleccionando el codec de VoIP %%%

fprintf(1, '\n\n\t\t\t\t\tLos codecs de VoIP disponibles son: ');
fprintf(1, '\n\n1-G711 (64 Kbps)\n2-G729 (8 Kbps)\n3-G723.1 (6.4 Kbps)\n4-
G723.1 (5.3 Kbps)\n5-G726 (32 Kbps)\n6-G729 (24 Kbps)\n7-G728 (16
Kbps)\n8-AMR (12.2 Kbps)\n9-G722.2 (12.85 Kbps)');
codec=input('\n\nIntroduce el codec de VoIP a utilizas: ');

switch codec
    case 1
        fprintf(1, '\n\nEl data rate a nivel IP es de 96 Kbps');
        fprintf(1, '\n\nEl data rate a nivel de capa fisica es de 105.6
Kbps\n\n');
```

```
%%Sección de selección de code rate %%%
disp('      MCS      m      c.r');
codrate=[0 2 0.11;1 2 0.14;2 2 0.17;3 2 0.22;4 2 0.28;5 2 0.34; 6
2 0.4;7 2 0.47;8 2 0.54;9 2 0.61;10 4 0.3;11 4 0.34;12 4 0.39;13 4
0.44;14 4 0.5;15 4 0.55;
16 4 0.59;17 6 0.39;18 6 0.42;19 6 0.46;20 6 0.51;21 6 0.55;22 6
0.6;23 6 0.64;24 6 0.69;25 6 0.74;26 6 0.78;27 6 0.81;28 6 0.81];
disp(codrate);
cr=input('\n\nIntroduce el code rate a emplear: ');

%%Cálculo del th con el code rate%%
thulcr=(thul*cr)/1000000;
disp('El throughput máximo en Mbps para UL es: ');
disp(thulcr);

thdlcr=(thdl*cr)/1000000;
disp('El throughput máximo en Mbps para DL es: ');
disp(thdlcr);
disp('Cada UE genera en promedio un tráfico de 105.6 Kbps por
llamada');

%%Cálculo del numero de llamadas admitidas con G711
%%

voip1=thulcr/0.1056;
calls1=floor(voip1);

voip2=thdlcr/0.1056;
calls2=floor(voip2);

disp('El número máximo de llamadas admitidas para UL con G711 es:
');
disp(calls1);
disp('El número máximo de llamadas admitidas para DL con G711 es:
');
disp(calls2);
ague=1;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% GENERACION DE LAS GRAFICAS UL-DL
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for i=1:ague:calls1+8
    for j=i:ague:calls1
        x=0.1056*i;
        end
        %disp(['Numero de UEs:',num2str(i)] );
        x=x*1;
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        %disp(['Trhoughput Mbbps: ',num2str(x)]);

    end

for p=1:ague:calls2+8
    for q=p:ague:calls2

        y=0.1056*p;
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
end
%disp(['Numero de UEs:',num2str(p)] );
y=y*1;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%disp(['Trhoughput bps: ',num2str(y)]);

end

%%%GRAFICA PARA UL %%%
a=calls1+8;
b=(a-calls1)/ague;
c=ones(1,b);
d=0.1056*calls1;
vec0=d*c;
vec1=0.1056:0.1056*ague:0.1056*calls1;
vec2=1:ague:calls1+8;
vec3=[vec1 vec0];
plot(vec2,vec3,'-or')
grid on;
hold on

%%%GRAFICZA PARA EL DOWNLINK %%%

a2=calls2+8;
b2=(a2-calls2)/ague;
c2=ones(1,b2);
d2=0.1056*calls2;
vec02=d2*c2;
vec12=0.1056:0.1056*ague:0.1056*calls2;
vec22=1:ague:calls2+8;
vec32=[vec12 vec02];
plot(vec22,vec32,'-sb')
grid on;
xlabel('UE');
ylabel('Throughput Mbps');
title('Throughput teórico vs UE ');
legend('Th UpLink','Th DownLink');
break

case 2
fprintf(1,'\n\nEl data rate a nivel IP es de 40 Kbps');
fprintf(1,'\n\nEl data rate a nivel de capa fisica es de 49.6
Kbps\n\n');
datrate=0.0496;

%%Sección de selección de code rate %%%
disp('      MCS      m      c.r');
codrate=[0 2 0.11;1 2 0.14;2 2 0.17;3 2 0.22;4 2 0.28;5 2 0.34; 6
2 0.4;7 2 0.47;8 2 0.54;9 2 0.61;10 4 0.3;11 4 0.34;12 4 0.39;13 4
0.44;14 4 0.5;15 4 0.55;
16 4 0.59;17 6 0.39;18 6 0.42;19 6 0.46;20 6 0.51;21 6 0.55;22 6
0.6;23 6 0.64;24 6 0.69;25 6 0.74;26 6 0.78;27 6 0.81;28 6 0.81];
disp(codrate);
cr=input('\n\nIntroduce el code rate a emplear: ');
```

```

    %%%Cálculo del th con el code rate%%
    thulcr=(thul*cr)/1000000;
    disp('El throughput máximo en Mbps para UL es: ');
    disp(thulcr);

    thdlcr=(thdl*cr)/1000000;
    disp('El throughput máximo en Mbps para DL es: ');
    disp(thdlcr);
    disp('Cada UE genera en promedio un tráfico de 49.6 Kbps por
    llamada');

    %%%Cálculo del numero de llamadas admitidas con G729
    %%%

    voip1=thulcr/datrate;
    calls1=floor(voip1);

    voip2=thdlcr/datrate;
    calls2=floor(voip2);

    disp('El número máximo de llamadas admitidas para UL con G729 es:
    ');
    disp(calls1);
    disp('El número máximo de llamadas admitidas para DL con G729 es:
    ');
    disp(calls2);
    ague=1;
    %%% GENERACION DE LAS GRAFICAS UL-DL
    %%%

    for i=1:ague:calls1+8
        for j=i:ague:calls1
            x=datrate*i;
            end
            %disp(['Numero de UEs:',num2str(i)] );
            x=x*1;
            %%%
            %disp(['Trhoughput Mbbps: ',num2str(x)]);

        end

    for p=1:ague:calls2+8
        for q=p:ague:calls2

            y=datrate*p;
            %%%

            end
            %disp(['Numero de UEs:',num2str(p)] );
            y=y*1;
            %%%
            %disp(['Trhoughput bps: ',num2str(y)]);

        end

    end

```

```
%%%GRAFICA PARA UL %%%
a=calls1+8;
b=(a-calls1)/ague;
c=ones(1,b);
d=datrate*calls1;
vec0=d*c;
vec1=datrate:datrate*ague:datrate*calls1;
vec2=1:ague:calls1+8;
vec3=[vec1 vec0];
plot(vec2,vec3, '-or')
grid on;
hold on

%%%GRAFICZA PARA EL DOWNLINK %%%

a2=calls2+8;
b2=(a2-calls2)/ague;
c2=ones(1,b2);
d2=datrate*calls2;
vec02=d2*c2;
vec12=datrate:datrate*ague:datrate*calls2;
vec22=1:ague:calls2+8;
vec32=[vec12 vec02];
plot(vec22,vec32, '-sb')
grid on;
xlabel('UE');
ylabel('Throughput Mbps');
title('Throughput teórico vs UE ');
legend('Th UpLink', 'Th DownLink');
break

case 3
fprintf(1, '\n\nEl data rate a nivel IP es de 17.067 Kbps');
fprintf(1, '\n\nEl data rate a nivel de capa fisica es de 20.26
Kbps\n\n');
datrate=0.02026667;

%%Sección de selección de code rate %%%
disp(' MCS m c.r');
codrate=[0 2 0.11;1 2 0.14;2 2 0.17;3 2 0.22;4 2 0.28;5 2 0.34; 6
2 0.4;7 2 0.47;8 2 0.54;9 2 0.61;10 4 0.3;11 4 0.34;12 4 0.39;13 4
0.44;14 4 0.5;15 4 0.55;
16 4 0.59;17 6 0.39;18 6 0.42;19 6 0.46;20 6 0.51;21 6 0.55;22 6
0.6;23 6 0.64;24 6 0.69;25 6 0.74;26 6 0.78;27 6 0.81;28 6 0.81];
disp(codrate);
cr=input('\n\nIntroduce el code rate a emplear: ');

%%Cálculo del th con el code rate%%
thulcr=(thul*cr)/1000000;
disp('El throughput máximo en Mbps para UL es: ');
disp(thulcr);

thdlcr=(thdl*cr)/1000000;
disp('El throughput máximo en Mbps para DL es: ');
```

```
disp(thdlcr);
disp('Cada UE genera en promedio un tráfico de 22.26 Kbps por
llamada');

%%%%%%%%% Cálculo del numero de llamadas admitidas con G723.1
%%%%%%%%%

voip1=thulcr/datrate;
calls1=floor(voip1);

voip2=thdlcr/datrate;
calls2=floor(voip2);

disp('El número máximo de llamadas admitidas para UL con G723.1
es: ');
disp(calls1);
disp('El número máximo de llamadas admitidas para DL con G723.1
es: ');
disp(calls2);
ague=1;
%%%%%%%%% GENERACION DE LAS GRAFICAS UL-DL
%%%%%%%%%

for i=1:ague:calls1+8
    for j=i:ague:calls1
        x=datrate*i;
        end
        %disp(['Numero de UEs:',num2str(i)] );
        x=x*1;
        %%%%%%%%%%
        %disp(['Trhoughput Mbbps: ',num2str(x)]);

    end

for p=1:ague:calls2+8
    for q=p:ague:calls2

        y=datrate*p;
        %%%%%%%%%%
        end
        %disp(['Numero de UEs:',num2str(p)] );
        y=y*1;
        %%%%%%%%%%
        %disp(['Trhoughput bps: ',num2str(y)]);

    end

%%GRAFICA PARA UL %%
a=calls1+8;
b=(a-calls1)/ague;
c=ones(1,b);
d=datrate*calls1;
vec0=d*c;
vec1=datrate:datrate*ague:datrate*calls1;
vec2=1:ague:calls1+8;
```

```
vec3=[vec1 vec0];
plot(vec2,vec3, '-or')
grid on;
hold on

%%%GRAFICZA PARA EL DOWNLINK %%%

a2=calls2+8;
b2=(a2-calls2)/ague;
c2=ones(1,b2);
d2=datrate*calls2;
vec02=d2*c2;
vec12=datrate:datrate*ague:datrate*calls2;
vec22=1:ague:calls2+8;
vec32=[vec12 vec02];
plot(vec22,vec32, '-sb')
grid on;
xlabel('UE');
ylabel('Throughput Mbps');
title('Throughput teórico vs UE ');
legend('Th UpLink', 'Th DownLink');
break

case 4
fprintf(1, '\n\nEl data rate a nivel IP es de 16 Kbps');
fprintf(1, '\n\nEl data rate a nivel de capa fisica es de 19.2
Kbps\n\n');
datrate=0.0192;

%%%Sección de selección de code rate %%%
disp('      MCS      m      c.r');
codrate=[0 2 0.11;1 2 0.14;2 2 0.17;3 2 0.22;4 2 0.28;5 2 0.34; 6
2 0.4;7 2 0.47;8 2 0.54;9 2 0.61;10 4 0.3;11 4 0.34;12 4 0.39;13 4
0.44;14 4 0.5;15 4 0.55;
16 4 0.59;17 6 0.39;18 6 0.42;19 6 0.46;20 6 0.51;21 6 0.55;22 6
0.6;23 6 0.64;24 6 0.69;25 6 0.74;26 6 0.78;27 6 0.81;28 6 0.81];
disp(codrate);
cr=input('\n\nIntroduce el code rate a emplear: ');

%%%Cálculo del th con el code rate%%%
thulcr=(thul*cr)/1000000;
disp('El throughput máximo en Mbps para UL es: ');
disp(thulcr);

thdlcr=(thdl*cr)/1000000;
disp('El throughput máximo en Mbps para DL es: ');
disp(thdlcr);
disp('Cada UE genera en promedio un tráfico de 19.2 Kbps por
llamada');

%%%Cálculo del numero de llamadas admitidas con G723.1
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

voip1=thulcr/datrate;
calls1=floor(voip1);
```

```
voip2=thdlcr/datrate;
calls2=floor(voip2);

disp('El número máximo de llamadas admitidas para UL con G723.1
es: ');
disp(calls1);
disp('El número máximo de llamadas admitidas para DL con G723.1
es: ');
disp(calls2);
ague=1;
%%%%%%%%%% GENERACION DE LAS GRAFICAS UL-DL
%%%%%%%%%%

for i=1:ague:calls1+8
    for j=i:ague:calls1
        x=datrate*i;
    end
    %disp(['Numero de UEs:',num2str(i)] );
    x=x*1;
    %%%%%%%%%%%
    %disp(['Trhoughput Mbbps: ',num2str(x)]);

end

for p=1:ague:calls2+8
    for q=p:ague:calls2

        y=datrate*p;
        %%%%%%%%%%%
    end
    %disp(['Numero de UEs:',num2str(p)] );
    y=y*1;
    %%%%%%%%%%%
    %disp(['Trhoughput bps: ',num2str(y)]);

end

%%%GRAFICA PARA UL %%%
a=calls1+8;
b=(a-calls1)/ague;
c=ones(1,b);
d=datrate*calls1;
vec0=d*c;
vec1=datrate:datrate*ague:datrate*calls1;
vec2=1:ague:calls1+8;
vec3=[vec1 vec0];
plot(vec2,vec3,'-or')
grid on;
hold on

%%%GRAFICZA PARA EL DOWNLINK %%%

a2=calls2+8;
b2=(a2-calls2)/ague;
```

```
c2=ones(1,b2);
d2=datrate*calls2;
vec02=d2*c2;
vec12=datrate:datrate*ague:datrate*calls2;
vec22=1:ague:calls2+8;
vec32=[vec12 vec02];
plot(vec22,vec32,'-sb')
grid on;
xlabel('UE');
ylabel('Throughput Mbps');
title('Throughput teórico vs UE ');
legend('Th UpLink','Th DownLink');
break

case 5
fprintf(1,'\n\nEl data rate a nivel IP es de 96 Kbps');
fprintf(1,'\n\nEl data rate a nivel de capa fisica es de 115.2
Kbps\n\n');
datrate=0.1232;

%%Sección de selección de code rate %%%
disp('      MCS      m      c.r');
codrate=[0 2 0.11;1 2 0.14;2 2 0.17;3 2 0.22;4 2 0.28;5 2 0.34; 6
2 0.4;7 2 0.47;8 2 0.54;9 2 0.61;10 4 0.3;11 4 0.34;12 4 0.39;13 4
0.44;14 4 0.5;15 4 0.55;
16 4 0.59;17 6 0.39;18 6 0.42;19 6 0.46;20 6 0.51;21 6 0.55;22 6
0.6;23 6 0.64;24 6 0.69;25 6 0.74;26 6 0.78;27 6 0.81;28 6 0.81];
disp(codrate);
cr=input('\n\nIntroduce el code rate a emplear: ');

%%Cálculo del th con el code rate%%
thulcr=(thul*cr)/1000000;
disp('El throughput máximo en Mbps para UL es: ');
disp(thulcr);

thdlcr=(thdl*cr)/1000000;
disp('El throughput máximo en Mbps para DL es: ');
disp(thdlcr);
disp('Cada UE genera en promedio un tráfico de 115.2 Kbps por
llamada');

%%Cálculo del numero de llamadas admitidas con G726
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

voip1=thulcr/datrate;
calls1=floor(voip1);

voip2=thdlcr/datrate;
calls2=floor(voip2);

disp('El número máximo de llamadas admitidas para UL con G726 es:
');
disp(calls1);
disp('El número máximo de llamadas admitidas para DL con G726 es:
');
```

```
disp(calls2);
ague=1;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% GENERACION DE LAS GRAFICAS UL-DL
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for i=1:ague:calls1+8
    for j=i:ague:calls1
        x=datrate*i;
    end
    %disp(['Numero de UEs:',num2str(i)] );
    x=x*1;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %disp(['Trhoughput Mbbps: ',num2str(x)]);

end

for p=1:ague:calls2+8
    for q=p:ague:calls2

        y=datrate*p;
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    end
    %disp(['Numero de UEs:',num2str(p)] );
    y=y*1;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %disp(['Trhoughput bps: ',num2str(y)]);

end

%%%GRAFICA PARA UL %%%
a=calls1+8;
b=(a-calls1)/ague;
c=ones(1,b);
d=datrate*calls1;
vec0=d*c;
vec1=datrate:datrate*ague:datrate*calls1;
vec2=1:ague:calls1+8;
vec3=[vec1 vec0];
plot(vec2,vec3,'-or')
grid on;
hold on

%%%GRAFICZA PARA EL DOWNLINK %%%

a2=calls2+8;
b2=(a2-calls2)/ague;
c2=ones(1,b2);
d2=datrate*calls2;
vec02=d2*c2;
vec12=datrate:datrate*ague:datrate*calls2;
vec22=1:ague:calls2+8;
vec32=[vec12 vec02];
plot(vec22,vec32,'-sb')
grid on;
xlabel('UE');
```

```
ylabel('Throughput Mbps');
title('Throughput teórico vs UE ');
legend('Th UpLink', 'Th DownLink');
break

case 6
fprintf(1, '\n\nEl data rate a nivel IP es de 88 Kbps');
fprintf(1, '\n\nEl data rate a nivel de capa fisica es de 107.2
Kbps\n\n');
datrate=0.1072;

%%Sección de selección de code rate %%%
disp('      MCS      m      c.r');
codrate=[0 2 0.11;1 2 0.14;2 2 0.17;3 2 0.22;4 2 0.28;5 2 0.34; 6
2 0.4;7 2 0.47;8 2 0.54;9 2 0.61;10 4 0.3;11 4 0.34;12 4 0.39;13 4
0.44;14 4 0.5;15 4 0.55;
16 4 0.59;17 6 0.39;18 6 0.42;19 6 0.46;20 6 0.51;21 6 0.55;22 6
0.6;23 6 0.64;24 6 0.69;25 6 0.74;26 6 0.78;27 6 0.81;28 6 0.81];
disp(codrate);
cr=input('\n\nIntroduce el code rate a emplear: ');

%%Cálculo del th con el code rate%%
thulcr=(thul*cr)/1000000;
disp('El throughput máximo en Mbps para UL es: ');
disp(thulcr);

thdlcr=(thdl*cr)/1000000;
disp('El throughput máximo en Mbps para DL es: ');
disp(thdlcr);
disp('Cada UE genera en promedio un tráfico de 107.2 Kbps por
llamada');

%%Cálculo del numero de llamadas admitidas con G726
%%
voip1=thulcr/datrate;
calls1=floor(voip1);

voip2=thdlcr/datrate;
calls2=floor(voip2);

disp('El número máximo de llamadas admitidas para UL con G726 es:
');
disp(calls1);
disp('El número máximo de llamadas admitidas para DL con G726 es:
');
disp(calls2);
ague=1;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% GENERACION DE LAS GRAFICAS UL-DL
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for i=1:ague:calls1+8
    for j=i:ague:calls1
        x=datrate*i;
```

```
        end
        %disp(['Numero de UEs:',num2str(i)] );
        x=x*1;
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        %disp(['Trhoughput Mbbps: ',num2str(x)]);

end

for p=1:ague:calls2+8
    for q=p:ague:calls2

        y=datrate*p;
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    end
    %disp(['Numero de UEs:',num2str(p)] );
    y=y*1;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %disp(['Trhoughput bps: ',num2str(y)]);

end

%%%GRAFICA PARA UL %%%
a=calls1+8;
b=(a-calls1)/ague;
c=ones(1,b);
d=datrate*calls1;
vec0=d*c;
vec1=datrate:datrate*ague:datrate*calls1;
vec2=1:ague:calls1+8;
vec3=[vec1 vec0];
plot(vec2,vec3,'-or')
grid on;
hold on

%%%GRAFICZA PARA EL DOWNLINK %%%

a2=calls2+8;
b2=(a2-calls2)/ague;
c2=ones(1,b2);
d2=datrate*calls2;
vec02=d2*c2;
vec12=datrate:datrate*ague:datrate*calls2;
vec22=1:ague:calls2+8;
vec32=[vec12 vec02];
plot(vec22,vec32,'-sb')
grid on;
xlabel('UE');
ylabel('Throughput Mbps');
title('Throughput teórico vs UE ');
legend('Th UpLink','Th DownLink');
break

case 7
    fprintf(1,'\n\nEl data rate a nivel IP es de 80 Kbps');
```

```
fprintf(1, '\n\nEl data rate a nivel de capa fisica es de 99.2
Kbps\n\n');
datrate=0.0992;

%%Sección de selección de code rate %%%
disp('      MCS      m      c.r');
codrate=[0 2 0.11;1 2 0.14;2 2 0.17;3 2 0.22;4 2 0.28;5 2 0.34; 6
2 0.4;7 2 0.47;8 2 0.54;9 2 0.61;10 4 0.3;11 4 0.34;12 4 0.39;13 4
0.44;14 4 0.5;15 4 0.55;
16 4 0.59;17 6 0.39;18 6 0.42;19 6 0.46;20 6 0.51;21 6 0.55;22 6
0.6;23 6 0.64;24 6 0.69;25 6 0.74;26 6 0.78;27 6 0.81;28 6 0.81];
disp(codrate);
cr=input('\n\nIntroduce el code rate a emplear: ');

%%Cálculo del th con el code rate%%
thulcr=(thul*cr)/1000000;
disp('El throughput máximo en Mbps para UL es: ');
disp(thulcr);

thdlcr=(thdl*cr)/1000000;
disp('El throughput máximo en Mbps para DL es: ');
disp(thdlcr);
disp('Cada UE genera en promedio un tráfico de 99.2 Kbps por
llamada');

%%Cálculo del numero de llamadas admitidas con G726
%%
voip1=thulcr/datrate;
calls1=floor(voip1);

voip2=thdlcr/datrate;
calls2=floor(voip2);

disp('El número máximo de llamadas admitidas para UL con G728 es:
');
disp(calls1);
disp('El número máximo de llamadas admitidas para DL con G728 es:
');
disp(calls2);
ague=1;
%%GENERACION DE LAS GRAFICAS UL-DL
%%
for i=1:ague:calls1+8
    for j=i:ague:calls1
        x=datrate*i;
    end
    disp(['Numero de UEs:',num2str(i)] );
    x=x*1;
    %%
    disp(['Trhoughput Mbbps: ',num2str(x)]);
end
```

```
for p=1:ague:calls2+8
    for q=p:ague:calls2

        y=datrate*p;
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    end
    %disp(['Numero de UEs:',num2str(p)] );
    y=y*1;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %disp(['Trhoughput bps: ',num2str(y)]);

end

%%%GRAFICA PARA UL %%%
a=calls1+8;
b=(a-calls1)/ague;
c=ones(1,b);
d=datrate*calls1;
vec0=d*c;
vec1=datrate:datrate*ague:datrate*calls1;
vec2=1:ague:calls1+8;
vec3=[vec1 vec0];
plot(vec2,vec3,'-or')
grid on;
hold on

%%%GRAFICZA PARA EL DOWNLINK %%%

a2=calls2+8;
b2=(a2-calls2)/ague;
c2=ones(1,b2);
d2=datrate*calls2;
vec02=d2*c2;
vec12=datrate:datrate*ague:datrate*calls2;
vec22=1:ague:calls2+8;
vec32=[vec12 vec02];
plot(vec22,vec32,'-sb')
grid on;
xlabel('UE');
ylabel('Throughput Mbps');
title('Throughput teórico vs UE ');
legend('Th UpLink','Th DownLink');
break

case 8
    fprintf(1,'\n\nEl data rate a nivel IP es de 28.2 Kbps');
    fprintf(1,'\n\nEl data rate a nivel de capa fisica es de 33
Kbps\n\n');
    datrate=0.033;

    %%Sección de selección de code rate %%%
    disp('      MCS      m      c.r');
```

```
codrate=[0 2 0.11;1 2 0.14;2 2 0.17;3 2 0.22;4 2 0.28;5 2 0.34; 6
2 0.4;7 2 0.47;8 2 0.54;9 2 0.61;10 4 0.3;11 4 0.34;12 4 0.39;13 4
0.44;14 4 0.5;15 4 0.55;
16 4 0.59;17 6 0.39;18 6 0.42;19 6 0.46;20 6 0.51;21 6 0.55;22 6
0.6;23 6 0.64;24 6 0.69;25 6 0.74;26 6 0.78;27 6 0.81;28 6 0.81];
disp(codrate);
cr=input('\n\nIntroduce el code rate a emplear: ');

%%%%Cálculo del th con el code rate%%%%%%%%
thulcr=(thul*cr)/1000000;
disp('El throughput máximo en Mbps para UL es: ');
disp(thulcr);

thdlcr=(thdl*cr)/1000000;
disp('El throughput máximo en Mbps para DL es: ');
disp(thdlcr);
disp('Cada UE genera en promedio un tráfico de 33 Kbps por
llamada');

%%%%%%%%% Cálculo del numero de llamadas admitidas con G726
%%%%%%%%%

voip1=thulcr/datrate;
calls1=floor(voip1);

voip2=thdlcr/datrate;
calls2=floor(voip2);

disp('El número máximo de llamadas admitidas para UL con AMR es:
');
disp(calls1);
disp('El número máximo de llamadas admitidas para DL con AMR es:
');
disp(calls2);
ague=1;
%%%%%%%%% GENERACION DE LAS GRAFICAS UL-DL
%%%%%%%%%

for i=1:ague:calls1+8
    for j=i:ague:calls1
        x=datrate*i;
    end
    %disp(['Numero de UEs:',num2str(i)] );
    x=x*1;
    %%%%%%%%%%
    %disp(['Trhoughput Mbbps: ',num2str(x)]);

end

for p=1:ague:calls2+8
    for q=p:ague:calls2

        y=datrate*p;
        %%%%%%%%%%
    end

end
```

```
    %disp(['Numero de UEs:',num2str(p)] );
    y=y*1;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %disp(['Trhoughput bps: ',num2str(y)]);

end

%%GRAFICA PARA UL %%
a=calls1+8;
b=(a-calls1)/ague;
c=ones(1,b);
d=datrate*calls1;
vec0=d*c;
vec1=datrate:datrate*ague:datrate*calls1;
vec2=1:ague:calls1+8;
vec3=[vec1 vec0];
plot(vec2,vec3,'-or')
grid on;
hold on

%%GRAFICZA PARA EL DOWNLINK %%

a2=calls2+8;
b2=(a2-calls2)/ague;
c2=ones(1,b2);
d2=datrate*calls2;
vec02=d2*c2;
vec12=datrate:datrate*ague:datrate*calls2;
vec22=1:ague:calls2+8;
vec32=[vec12 vec02];
plot(vec22,vec32,'-sb')
grid on;
xlabel('UE');
ylabel('Throughput Mbps');
title('Throughput teórico vs UE ');
legend('Th UpLink','Th DownLink');

case 9
fprintf(1,'\n\nEl data rate a nivel IP es de 44.85 Kbps');
fprintf(1,'\n\nEl data rate a nivel de capa fisica es de 54.45
Kbps\n\n');
datrate=0.05445;

%%Sección de selección de code rate %%%
disp('      MCS      m      c.r');
codrate=[0 2 0.11;1 2 0.14;2 2 0.17;3 2 0.22;4 2 0.28;5 2 0.34; 6
2 0.4;7 2 0.47;8 2 0.54;9 2 0.61;10 4 0.3;11 4 0.34;12 4 0.39;13 4
0.44;14 4 0.5;15 4 0.55;
16 4 0.59;17 6 0.39;18 6 0.42;19 6 0.46;20 6 0.51;21 6 0.55;22 6
0.6;23 6 0.64;24 6 0.69;25 6 0.74;26 6 0.78;27 6 0.81;28 6 0.81];
disp(codrate);
cr=input('\n\nIntroduce el code rate a emplear: ');

%%Cálculo del th con el code rate%%
```

```
thulcr=(thul*cr)/1000000;
disp('El throughput máximo en Mbps para UL es: ');
disp(thulcr);

thdlcr=(thdl*cr)/1000000;
disp('El throughput máximo en Mbps para DL es: ');
disp(thdlcr);
disp('Cada UE genera en promedio un tráfico de 33.6 Kbps por
llamada');

%%%%%%%%% Cálculo del numero de llamadas admitidas con G726
%%%%%%%%%

voip1=thulcr/datrate;
calls1=floor(voip1);

voip2=thdlcr/datrate;
calls2=floor(voip2);

disp('El número máximo de llamadas admitidas para UL con G722.2
es: ');
disp(calls1);
disp('El número máximo de llamadas admitidas para DL con G722.2
es: ');
disp(calls2);
ague=1;
%%%%%%%%% GENERACION DE LAS GRAFICAS UL-DL
%%%%%%%%%

for i=1:ague:calls1+8
    for j=i:ague:calls1
        x=datrate*i;
        end
        %disp(['Numero de UEs:',num2str(i)] );
        x=x*1;
        %%%%%%%%%%
        %disp(['Trhoughput Mbbps: ',num2str(x)]);

    end

for p=1:ague:calls2+8
    for q=p:ague:calls2

        y=datrate*p;
        %%%%%%%%%%
    end
    %disp(['Numero de UEs:',num2str(p)] );
    y=y*1;
    %%%%%%%%%%
    %disp(['Trhoughput bps: ',num2str(y)]);

end

%%%GRAFICA PARA UL %%%
```

```
a=calls1+8;
b=(a-calls1)/ague;
c=ones(1,b);
d=datrate*calls1;
vec0=d*c;
vec1=datrate:datrate*ague:datrate*calls1;
vec2=1:ague:calls1+8;
vec3=[vec1 vec0];
plot(vec2,vec3,'-or')
grid on;
hold on

%%%GRAFICZA PARA EL DOWNLINK %%%

a2=calls2+8;
b2=(a2-calls2)/ague;
c2=ones(1,b2);
d2=datrate*calls2;
vec02=d2*c2;
vec12=datrate:datrate*ague:datrate*calls2;
vec22=1:ague:calls2+8;
vec32=[vec12 vec02];
plot(vec22,vec32,'-sb')
grid on;
xlabel('UE');
ylabel('Throughput Mbps');
title('Throughput teórico vs UE ');
legend('Th UpLink','Th DownLink');

break

end
```