



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

# **Modelado de voz en redes celulares 4G y 5G: LTE**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero en Telecomunicaciones**

**P R E S E N T A**

Luis Enrique Colin García

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Victor Rangel Licea



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



---

## **Jurado asignado**

Presidente: M.I. Jesús Reyes García

Vocal: Dr. Victor Rangel Licea

Secretario: Dr. Victor García Garduño

1er Suplente: M.I. Juventino Cuellar González

2do Suplente: Dr. Javier Gómez Castellanos

Lugar donde se realizó la tesis: México, CDMX

**DIRECTOR DE TESIS**

-----  
Dr. Victor Rangel Licea

---



---

## Dedicatoria

A mi familia: María Luisa, Jorge Erick, y Fernando Alberto, por ser el motor de mi vida y mi apoyo incondicional. No hay nada que decir; los amo para siempre.

A Claudia por siempre estar presente y por su motivación constante para cumplir lo propuesto; gracias por todo. A su familia por apoyarme y por todas las consideraciones.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por ser mi segundo hogar y un espacio único al cual le debo el orgullo de ser Universitario.

---



---

## Agradecimientos

### Al Dr. Victor Rangel Licea

Por su paciencia y su orientación, por la apertura compartiendo su conocimiento. Por su dirección que ha sido esencial para que el presente se haya concretado.

### A los profesores de la Facultad de Ingeniería

Por la docencia que me ha formado profesionalmente y por el apoyo que he recibido de su parte.

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM en los Proyectos **IN114713 – ‘Diseño y análisis de algoritmos de calendarización en redes LTE y WIMAX’** y **IN116316 –“Diseño y evaluación de técnicas de calendarización aplicadas a los Sistemas de Transporte Inteligente”**.

Agradezco a la DGAPA-UNAM por la beca recibida.

---



---

# Índice General

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
1.1 Marco de las comunicaciones móviles.....	2
1.2 Definición del problema .....	4
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Metas y contribuciones .....	4
1.5 Metodología.....	5
1.6 Estructura de la Tesis.....	5
<b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>7</b>
2.1 De 1G a 3G .....	7
2.2 Fundamentos de comunicaciones móviles .....	10
2.3 Arquitectura de sistemas de telefonía celular.....	12
2.4 Arquitectura de redes LTE.....	13
2.5 Arreglos MIMO .....	14
2.6 Protocolos en plano de usuario y plano de control.....	15
2.7 Codificación en redes LTE .....	17
2.8 LTE-Advanced.....	18
<b>3. PROTOCOLOS DE LTE.....</b>	<b>20</b>
3.1 Introducción.....	20
3.2 Interfaz de radio LTE.....	21
3.3 Modulación en LTE .....	23
3.4 OFDM.....	24
3.5 Bloque de recursos .....	26
3.6 Estructura de trama .....	27
3.7 Enlaces ascendente y descendente. ....	30
3.8 Protocolos y uso de canales en capa de enlace.....	33
3.9 Scheduling .....	38

---

---

<b>4.</b>	<b>DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE VOZ SOBRE LTE .....</b>	<b>40</b>
4.1	Introducción .....	40
4.2	Diseño y topología de red .....	41
4.3	EPS Bearers .....	42
4.4	Radio Bearers.....	43
4.5	Parámetros de QoS.....	45
4.6	Codificación para VoIP.....	46
4.7	Tráfico de voz (VoIP) en LTE.....	48
<b>5.</b>	<b>MODELO TEÓRICO DE IMPLEMENTACIÓN.....</b>	<b>51</b>
5.1	Introducción .....	51
5.2	Configuración de los servicios y elementos .....	52
5.3	Elaboración de interfaz .....	56
5.4	Variables de simulador .....	57
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS Y CASOS EJEMPLO .....</b>	<b>60</b>
6.1	Introducción .....	60
6.2	Análisis de desempeño.....	61
6.3	Análisis de tráfico de voz.....	65
6.4	Análisis combinado de tráfico de voz.....	80
6.5	Estimaciones sobre la cantidad de usuarios admitidos.....	83
6.6	Caso real de uso: Monitoreo de VoLTE.....	85
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>94</b>
7.1	Introducción .....	94
7.2	Proyección a futuro de redes LTE.....	94
7.3	Argumentación.....	96
7.4	Contribuciones.....	97
	<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....</b>	<b>98</b>
	<b>Apéndice A. Acrónimos y abreviaciones .....</b>	<b>101</b>
	<b>Apéndice B. Código de Matlab.....</b>	<b>105</b>

---



---

## Índice de Figuras

Figura 2.1 Evolución de la telefonía celular [10] .....	8
Figura 2.2 Evolución del uso de datos en la telefonía celular [10] .....	9
Figura 2.3 Tráfico de Voz y Datos en el mundo - Enero 2007 a Julio 2011. [9] .....	9
Figura 2.4 Capacidad de Canal en un sistema de comunicaciones (BW = 5, 10 y 20 MHz). [9] .....	10
Figura 2.5 Arquitectura GSM/UMTS y LTE/SAE. ....	12
Figura 2.6 Arquitectura EPS. [8] .....	13
Figura 2.7 Técnicas MIMO de acuerdo al tipo de ambiente de radio. [8] .....	14
Figura 2.8 Protocolos entre UE y servidor externo con uso de S5/S8 (GTP). [9] .....	15
Figura 2.9 Stack de protocolos usados para mensajes de señalización NAS. [9] .....	16
Figura 2.10 LTE-Advanced [8] .....	19
Figura 3.1 Arquitectura de protocolo para interfaz de radio alrededor de capa física [9].....	21
Figura 3.2 Ancho de banda flexible en LTE [8] .....	21
Figura 3.3 FDD y TDD [8].....	22
Figura 3.4 Modulación adaptativa [8] .....	23
Figura 3.5 OFDM [21] .....	24
Figura 3.6 Distribución de ancho de banda de canal en LTE [22].....	25
Figura 3.7 Resource Grid en dominio de frecuencia y tiempo (Con CP Normal) [21] .....	26
Figura 3.8 Estructura de trama tipo 1 [21].....	27
Figura 3.9 Estructura de trama tipo 2 [21].....	28
Figura 3.10 Configuración de UL-DL para estructura de trama tipo 2 [24] .....	29
Figura 3.11 Prefijo cíclico .....	30
Figura 3.12 Jerarquía de protocolos en capa 2.....	33
Figura 3.13 Mapeo de canales en DL [9] .....	36
Figura 3.14 Mapeo de canales en UL [9] .....	37
Figura 3.15 Agregado de encabezados [26] .....	37
Figura 3.16 Scheduling para DL [8] .....	38
Figura 3.17 Scheduling para UL [8] .....	39
Figura 4.1 Arquitectura básica de IMS [9] .....	41
Figura 4.2 Concepto de EPS Bearer [26].....	42
Figura 4.3 SRVCC [10].....	49
Figura 4.4 CS Fallback [10] .....	50

---

---

Figura 5.1 Paquete de VoIP [22] .....	52
Figura 5.2 AMR vs GSM Full Rate, Half rate, Enhanced Full Rate [29].....	55
Figura 5.3 Ejemplo de gráfica ‘Distancia radial’ .....	58
Figura 5.4 Ejemplo de gráfica ‘SNR contra distancia’ .....	58
Figura 5.5 Ejemplo de gráfica ‘Prx contra distancia’ .....	59
Figura 6.1 Rejilla de Elementos de Recurso en simulación.....	63
Figura 6.2 Diagrama de flujo para dimensionamiento de ambiente de radio en eNB .....	64
Figura 6.3 Caso ejemplo #1 en Interfaz gráfica de modelado de voz .....	67
Figura 6.4 Caso ejemplo #2 en Interfaz gráfica de modelado de voz.....	69
Figura 6.5 Caso ejemplo #3 en Interfaz gráfica de modelado de voz .....	71
Figura 6.6 Caso ejemplo #4 en Interfaz gráfica de modelado de voz.....	73
Figura 6.7 Caso ejemplo #5 en Interfaz gráfica de modelado de voz .....	75
Figura 6.8 Caso ejemplo #6 en Interfaz gráfica de modelado de voz.....	77
Figura 6.9 Caso ejemplo #7 en Interfaz gráfica de modelado de voz.....	79
Figura 6.10 Llamadas admitidas por Codec G711 .....	81
Figura 6.11 Llamadas admitidas por Codec AMR-NB 4.75 .....	81
Figura 6.12 Llamadas admitidas por Codec AMR-WB 6.60.....	81
Figura 6.13 Gráfico comparativo de tres codecs bajo prueba.....	82
Figura 6.14 GUI con parámetros de configuración para evaluación de codecs.....	82
Figura 6.15 Estimaciones sobre la cantidad de usuarios.....	84
Figura 6.16 Obtención de llamadas admitidas para caso real VoLTE.....	86
Figura 6.17 Llamadas permitidas de forma simultanea por cada eNB .....	89

---



---

## Índice de Tablas

Tabla 3.1 Relación RBs con BW .....	27
Tabla 3.2 Configuración de la subtrama especial .....	29
Tabla 4.1 Signaling Radio Bearers .....	44
Tabla 4.2 Data Radio Bearers .....	44
Tabla 4.3 Calidad de servicio (QoS)-QCI [8] .....	46
Tabla 4.4 Tipos de codificadores para VoIP [28] .....	47
Tabla 5.1 Codecs para VoIP .....	53
Tabla 5.2 Codecs para VoLTE .....	54
Tabla 6.1 Despliegue de VoLTE según prestador de servicios de telefonía móvil .....	87
Tabla 6.2 Suscriptores de VoLTE .....	88
Tabla 6.3 Suposiciones realizadas para dimensionamiento de VoLTE .....	88
Tabla 6.4 Relación de Zona-Llamadas por segundo .....	90
Tabla 6.5 Variables a campos de dimensionamiento .....	91
Tabla 6.6 Tipos de Probes a instalar por fabricante .....	92
Tabla 6.7 Resultados de dimensionamiento .....	93

---



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 Marco de las comunicaciones móviles

Previo al año de 1980, los sectores de investigación, el sector empresarial, y en especial el sector público, han prestado atención puntual al sistema de telefonía celular a causa del alto impacto que tiene ésta en la comunicación a distancia. Actualmente es posible hacer uso de distintos servicios que actúan como complemento al servicio fundamental de comunicación por voz, tales como acceso a información multimedia, almacenamiento de archivos, conexión a redes, entre una gran variedad.

Inicialmente, los sistemas de comunicación móvil brindaban únicamente el servicio de comunicación por voz. Sucesivamente, en 1990, se logró una evolución al desarrollarse una segunda generación donde se incluía, anexo al servicio de transmisión de voz, el servicio de mensajes de texto SMS (Short Message Service). Posteriormente se posibilitó la transferencia de datos mediante una tecnología llamada GPRS [1] (General Packet Radio System) capaz de proveer una conexión a internet al usuario. Una tercera generación (3G) aparece gracias a la implementación de estándares como HSPA [2] (High Speed Packet Access) y UMTS [3] (Universal Mobile Telecommunications System), cuyas funcionalidades fueron el incremento de la velocidad en la transferencia de datos y una mayor calidad de servicio; el sistema 3G contemplaba la posible interconexión con sistemas de segunda generación (2G), lo que lo identificó como un proyecto escalable por presentar un aumento en el número de suscriptores. Por consiguiente, se buscó optimizar el uso de recursos que se les proporcionaba a los usuarios en aras de lograr una mayor eficiencia en los procesos y mejorar los servicios; estos fines eran alcanzables realizando mejoras en el estándar UMTS, dando lugar al desarrollo de nuevas tecnologías: el sistema Long Term Evolution [4] (LTE).

LTE fue diseñado por una institución que colabora para estándares de telecomunicaciones nacionales y regionales conocida como Third Generation Partnership Project (3GPP) [5]; por lo cual, el nombre completo del sistema es *3GPP Long Term Evolution*. Su propósito es aumentar la velocidad y capacidad de las redes móviles celulares con el fin de que sea este, un sistema capacitado para proveer más y mejores servicios al usuario. El diseño de LTE tuvo lugar simultáneamente con una iniciativa de la *International Telecommunication Union* (ITU). A finales del año 1990, la ITU ayudó a manejar el desarrollo de las tecnologías de 3G mediante la publicación de una serie de requerimientos para el sistema de comunicación móvil 3G, bajo el nombre de *International Mobile Telecommunications (IMT) 2000*. La ITU realizó un proceso similar en 2008, publicando una lista de requerimientos para un sistema de comunicación de cuarta generación (4G) bajo el nombre de *IMT-Advanced* [6]. De acuerdo a *IMT-Advanced*, LTE es un sistema 3.9G, pues actualmente este no cumple con los requerimientos para formar parte de los sistemas de cuarta generación, los cuáles deben proporcionar mejoras en aspectos como eficiencia espectral, menor latencia para permitir la operación de nuevas aplicaciones sensibles al retardo, mejor rendimiento celular, bajo costo y menor complejidad en el uso de las terminales, provisión para tener convivencia con redes fijas, mayor rendimiento en las tasas de transferencia de datos, uniformidad de funciones en todo el mundo, mantener la flexibilidad de admitir una amplia gama de servicios y aplicaciones rentables y soportar movilidad.

Las especificaciones para LTE son producidas por la *3GPP*, en el mismo sentido que las especificaciones para UMTS y GSM. Estas están organizadas en ‘*releases*’ o *lanzamientos*, donde cada una establece claramente un conjunto de características. El uso de ‘*lanzamientos*’ permite a los fabricantes construir dispositivos que usen algunas o todas las características de lanzamientos anteriores, todo mientras *3GPP* continúa añadiendo nuevas características al sistema de lanzamiento actual.

El sistema LTE implementa por primera vez, que todos los servicios proporcionados, incluyendo la transmisión de voz, se soportan sobre el *protocolo IP* (Internet Protocol), las velocidades pico pueden alcanzar hasta 300 Mbps en enlace de bajada y 75 Mbps en enlace de subida, el uso de OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) [7] como técnica de acceso en la interfaz de radio y ancho de banda escalable, donde se tiene la posibilidad de trabajar con canales que van desde 1.4 MHz hasta 20 MHz (i.e. 1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz). A diferencia de estándares de comunicaciones móviles anteriores como UMTS y GSM, LTE trabaja únicamente con conmutación de paquetes, empleando el uso de canales compartidos y no canales dedicados como se hacía anteriormente, lo que se traduce en un incremento significativo del número de usuarios que acceden simultáneamente en la red. Esto permite una entrega de servicios paralela a un alto número de suscriptores, estableciendo para cada uno de ellos una serie de parámetros que definen el enlace; la prioridad del servicio, el ancho de banda del canal de acceso, el modo de transmisión (FDD o TDD), la modulación utilizada, potencia máxima de transmisión, el tipo de servicio, y lo más significativo: el tipo de calidad de servicio (QoS) para cada suscriptor; el cual determina por ejemplo, de acuerdo al contrato que el usuario tenga con la compañía telefónica qué cantidad, tipo y manejo de servicios presenta su perfil adicionado a la característica para priorización de las solicitudes que se generen frente a las de otros usuarios.

## 1.2 Definición del problema

El estudio de QoS en la transmisión de voz (VoIP) resulta fundamental para definir la capacidad con calidad aceptable, soportada por el sistema de comunicación móvil LTE. La transmisión de voz es uno de los servicios de mayor demanda, por lo tanto, es necesario mantener una comunicación estable independientemente del tipo de tráfico que exista en la red. Por esto, deben considerarse las diferentes modalidades para el desarrollo del protocolo de comunicación en este sistema, pues existen múltiples parámetros que definirán la particularidad del servicio brindado a cada suscriptor.

La finalidad del servicio de transmisión de voz es asegurar una calidad de servicio aceptable en tiempo real así como una baja latencia. Para cumplir con esto, en el sistema LTE se emplean diversos métodos para proporcionar el servicio de VoIP.

**VoLTE** (Voice over LTE) [8]: método donde el control de llamada y la llamada misma, se realizan en la plataforma IMS (IP Multimedia Subsystem), que es otra red de 3GPP. Lo hace directamente en el dominio de conmutación de paquetes.

**SRVCC** (Single Radio Voice Call Continuity) [8]: técnica que permite transferir la llamada del dispositivo móvil que usa comunicación VoIP sobre IMS (VoLTE) a la comunicación por conmutación de circuitos (GSM/WCDMA) tradicional sobre GSM si el usuario sale del área de cobertura de LTE.

**CSFB** (Circuit Switch Fall-Back) [8]: En LTE es la tecnología que permiten realizar llamadas de voz utilizando una red 2G o 3G (dominio de CS) antes de que la llamada sea iniciada o recibida.

Con un enfoque en el estudio de voz sobre LTE (VoLTE), se estudiarán los parámetros que intervienen en la parte de acceso para que se lleve a cabo una adecuada transmisión de la información.

## 1.3 Objetivos

El objetivo del presente trabajo es modelar un sistema de simulación que permita la evaluación de diferentes parámetros en una red LTE para el servicio de voz y haciendo uso de codecs para VoIP, y codecs para VoLTE de banda angosta y banda ancha, así como la incorporación de tecnología utilizada en lanzamientos de LTE actuales referente a la modulación adaptativa, a la utilización de ancho de banda variable, y a la utilización de técnica MIMO.

Habilitar con los resultados obtenidos del modelo de simulación, la comparación de red LTE con redes 3G y 2G en lo que refiere a calidad del servicio, latencias, número de usuarios por célula soportados por la red sin causar interferencias utilizando diferentes codificadores de audio, esquemas de codificación y modulación.

## 1.4 Metas y contribuciones

Obtener un modelo de simulación que permita la variación de parámetros en una red LTE y que haga uso de técnicas y tecnología actualizada para un entendimiento de los parámetros aproximados necesarios para el correcto desarrollo de un sistema de comunicación en redes de telefonía celular de última generación.

Como complemento, el trabajo de simulación será implementado como apoyo didáctico cuyo acceso estará disponible para estudiantes de maestría y/o licenciatura que se encuentren realizando estudios sobre redes LTE, de tal forma que dicho sistema de simulación les permita un trabajo de investigación y diseño de mayor profundidad con la facilidad de modelar distintos escenarios para la red de acceso y enfocado al servicio de VoLTE.

## 1.5 Metodología

Para su realización, se modelará el sistema de simulación en la herramienta de software matemático MATLAB, donde se implementarán características gráficas y algoritmos de selección de parámetros que confluyan en una interfaz amigable al usuario. Se desplegarán comparaciones de apoyo y apartados de ayuda donde será posible una orientación a través del software para lograr la adaptación del diseño de red deseado al archivo de simulación sobre el cual se trabaja.

## 1.6 Estructura de la Tesis

El presente trabajo está desarrollado en siete capítulos de contenido de investigación, un apartado de Referencias y dos Apéndices para Acrónimos y Código de Matlab. De los primeros siete apartados, el primero está enfocado a fundamentar el objetivo y la necesidad de desarrollo de la investigación. Se incluyen elementos de inducción al requerimiento actual para la evolución de la telefonía celular y su adaptación con el resto de tipos de redes.

El segundo capítulo está orientado a definir de manera general, la implementación que se tiene de la red hasta el día de hoy; se visualizan factores ligeramente más específicos que en el primer capítulo, con los cuales se busca crear un marco de antecedentes que deben cumplir las nuevas adiciones al sistema para lograr así, una evolución acoplada en su despliegue.

En el tercer capítulo se observan los protocolos necesarios para establecer la comunicación en la interfaz de radio y el tipo de tratamiento que se hace para la asignación de recursos de acuerdo a algunos parámetros que también se definen en el apartado. Se definen conceptos básicos cuyo uso es fundamental para la gestión de este tipo de red.

El cuarto capítulo define elementos sobre los cuales es necesario enfocarse para establecer un diseño adecuado de red. Los nodos necesarios para la implementación del sistema EPS/LTE, el concepto que habilita la distinción para los servicios que son entregados de acuerdo a la suscripción del usuario, la codificación que es posible utilizar, así como un detalle de las opciones en la red para la entrega del servicio; todo lo anterior representa un extracto de información que es plasmada a detalle en esta sección.

Para el quinto apartado se describe la configuración realizada en el software de pruebas, añadiendo las variables utilizadas para el manejo de la información mostrada, el método de elaboración de la interfaz gráfica, la explicación de los apartados incluidos en la GUI, y la inclusión de elementos base del modelo teórico (i.e. el enfoque del trabajo de investigación).

En el capítulo número seis, se observan los casos gráficos donde son analizados los resultados obtenidos. Luego de haber realizado las pruebas, es en este apartado donde se tiene la proyección de factibilidad para un diseño previamente elegido. Se muestra a la herramienta en cuestión como un habilitador de comparativos para diferentes tipos de diseño de red. En este apartado se observa y analiza el desempeño de la interfaz, y también se analiza el alcance del software para la implementación como un apoyo académico, pues se muestra de qué forma es posible integrar la herramienta para el dimensionamiento productivo con datos de un prestador de servicios de telefonía móvil cuya operación es vigente en México.

Para el último bloque de desarrollo, capítulo número siete, se tienen las conclusiones del trabajo de investigación, la proyección que actualmente se percibe sobre el uso de las redes de última tecnología y en específico de la red LTE. En esta sección se argumenta la aportación que genera el desarrollo de este trabajo.

En el apartado ‘Bibliografía y Referencias’ se indican los documentos consultados, mismos que han servido como base para la realización de este escrito.

La última sección incluye un apéndice A que comprende acrónimos y abreviaciones. El apéndice B apunta por el código utilizado para Matlab, y a través del cual se obtiene la GUI con la que se trabaja para el presente trabajo de tesis.

# CAPÍTULO 2

## ESTADO DEL ARTE

---

### 2.1 De 1G a 3G

Los sistemas de telecomunicaciones móviles fueron primeramente introducidos en inicios de la década de los 80's. Los sistemas de primera generación (1G) usaban técnicas de comunicación analógica, que era similar a la que usaba el radio tradicional analógico. Las células individuales eran grandes y los sistemas no usaban el espectro radioeléctrico disponible de forma eficiente, por lo que su capacidad era, comparada con los estándares actuales, muy baja. Las terminales móviles eran costosas y físicamente grandes, siendo comercializadas casi exclusivamente para un sector empresarial.

Las telecomunicaciones móviles se abrieron como producto al consumidor con la introducción de sistemas de segunda generación (2G) a principios de la década de los '90. Estos sistemas fueron los primeros en usar tecnología digital, lo que permitía un uso eficiente del espectro radio eléctrico, así como la inducción de equipos más baratos y pequeños. Originalmente el sistema estaba diseñado sólo para voz, pero más tarde se mejoró para soportar el servicio de mensajería instantánea a través del sistema *Short Message Service* (SMS). El sistema de segunda generación más popular fue el *Global System for Mobile Communications* (GSM), que fue diseñado originalmente para Europa, pero que se volvió popular a lo largo del mundo. *IS-95*, también conocido como *CDMAOne*, fue diseñado por Qualcomm, y se convirtió en el sistema dominante de 2G en Estados Unidos de América. [9]

› 1G FDMA (NMT, AMPS, TACS) - Voice (analog traffic, digital signaling)	80's
› 2G TDMA (GSM, D-AMPS, PDC) and CDMA (IS-95) - Voice, SMS, CS data transfer ~ 9.6 kbit/s (50 kbit/s HSCSD)	90's
› 2.5G TDMA (GPRS) - PS data transfer ~ 50 kbit/s	00's
› 2.75G TDMA (GPRS+EDGE) - PS data ~ 500kbit/s	00's
› 3-3.5G WCDMA (UMTS) and CDMA 2000 - PS & CS data transfer ~ 14-84 Mbit/s (HSPA/HSPA+), Voice, SMS	00's
› 3.9G OFDMA (LTE/SAE) - PS Data and Voice (VoIP) for LTE ~ 300 Mbit/s	10's
› 4G IMT Advanced	

Figura 2.1 Evolución de la telefonía celular [10]

El éxito de los sistemas de comunicación de segunda generación surgió a la par del nacimiento de internet. Por lo anterior, fue necesario para los operadores de redes asociar ambos conceptos, permitiendo a los usuarios descargar datos en sus dispositivos móviles. Para hacer esto, se construyeron sistemas 2.5G basados en la idea original de 2G, introduciendo al núcleo de red el dominio de conmutación de paquetes y modificando la interfaz aérea para habilitar el manejo de datos tal como se hace con la voz.

El servicio de radio para paquetes o *General Packet Radio Service* (GPRS) incorporó estas técnicas en *GSM*, mientras *IS-95* desarrolló un sistema conocido como *IS-95B*.

A su vez, las tasas de datos en internet fueron incrementando progresivamente. Para reflejar el avance, los diseñadores optimizaron el desempeño de sistemas 2G usando técnicas como el *Enhanced Data Rates for GSM Evolution* (EDGE) para entonces introducir sistemas de tercera generación o 3G justo después del año 2000.

Los sistemas de tercera generación utilizan técnicas diferentes para la transmisión y recepción de radio a las usadas por sus predecesores de segunda generación, incrementando el valor máximo que las tasas de datos pueden alcanzar, por lo cual se hace más eficiente el uso del espectro radioeléctrico disponible.

Desafortunadamente, los primeros sistemas 3G fueron excesivamente saturados y su desempeño no cumplió con las expectativas. Debido a esto, 3G prosperó luego de la introducción de sistemas 3.5G en 2005. En estos sistemas, la interfaz aérea incluye optimizaciones extra que están enfocadas a aplicaciones de datos, lo que incrementa la tasa promedio a la cual un usuario puede subir o descargar información, a expensas de introducir una mayor variabilidad en las tasas de datos y en la latencia.

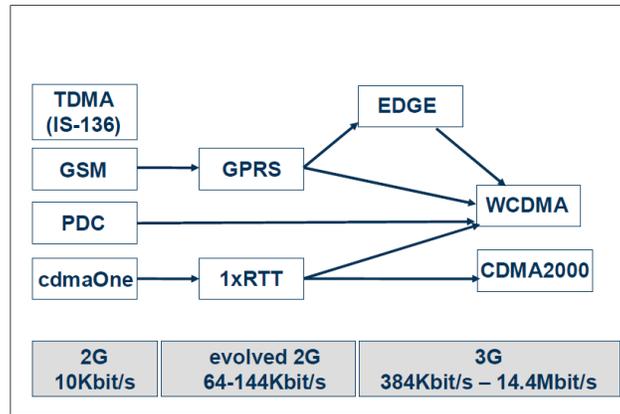


Figura 2.2 Evolución del uso de datos en la telefonía celular [10]

Por muchos años, las llamadas de voz dominaron el tráfico en redes de telecomunicaciones móviles. El crecimiento de datos móviles fue inicialmente lento, pero en la década previa a 2010, su uso empezó a crecer dramáticamente. Para ilustrar esto, la Figura 2.1 muestra mediciones del tráfico total manejado por las redes en todo el mundo, en PetaBytes (Millones de GigaBytes) por mes.

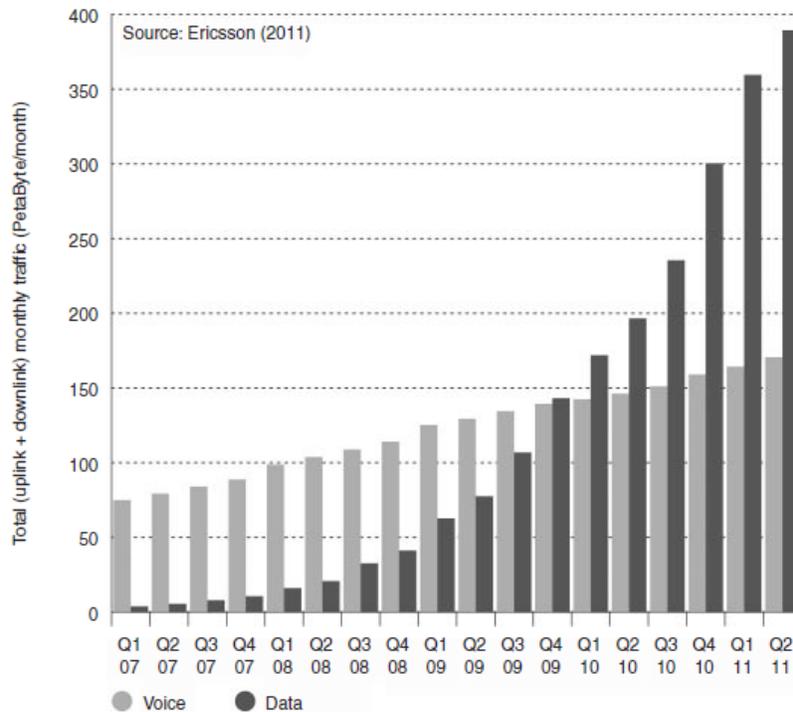


Figura 2.3 Tráfico de Voz y Datos en el mundo - Enero 2007 a Julio 2011. [9]

Como resultado de la demanda en el mercado, las redes 2G y 3G comenzaron a verse congestionadas hacia el año 2010, apuntando hacia el requerimiento de aumento de la capacidad de la red. A continuación, se revisarán los límites en capacidad de un sistema de comunicaciones móviles así como las características a considerar para un óptimo desempeño.

## 2.2 Fundamentos de comunicaciones móviles

### Capacidad del canal

En 1948, Claude Shannon descubrió un límite teórico de las tasas de transmisión de datos que puede ser alcanzado por cualquier sistema de comunicación. Escribiendo este límite de la manera más simplificada como lo siguiente [9]:

$$C = B \log_2(1 + SINR) \quad (1.1)$$

Donde

- *SINR*: Señal a interferencia más intensidad de ruido. La potencia en el receptor debido a la señal requerida, dividida entre la potencia debido al ruido y la interferencia.
- *B*: Ancho de banda del sistema de comunicación en [Hz].
- *C*: Capacidad del canal en [ $s^{-1}$ ].

En un sistema de comunicaciones móviles, *C* es la tasa máxima de datos que una célula puede manejar y equivale a la suma de todas las tasas de datos de todos los dispositivos móviles en la célula.

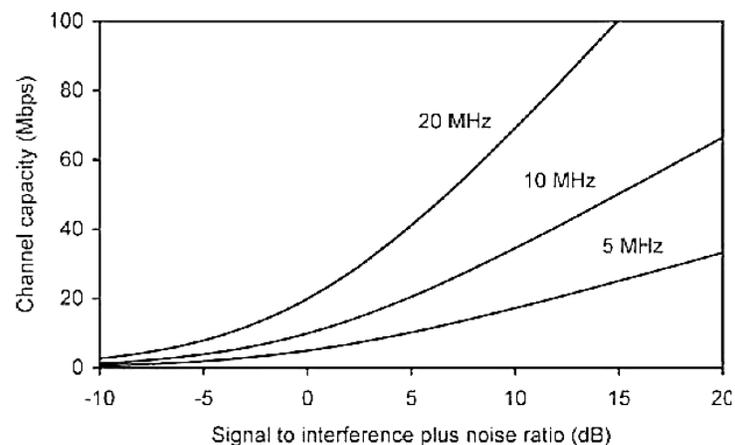


Figura 2.4 Capacidad de Canal en un sistema de comunicaciones ( $BW = 5, 10$  y  $20$  MHz). [9]

**Características para diseño de sistema celular**

- Densidad de usuarios  $U$  [usuarios/ $Km^2$ ]
- Tráfico promedio de usuario  $T$  [bits/usuario]
- Ancho de banda  $B$  [Hz]
- Eficiencia espectral  $E$  [bits/Hz]
- Área de cobertura de estación base  $S$  [ $Km^2$ ]

**Características de propagación de la onda electromagnética**

- *Fluctuaciones.* Son pequeñas variaciones de la señal recibida, y que se debe a interferencias de tipo constructiva y destructiva con otras señales.
- *Velocidad del usuario móvil.* La alteración en el movimiento introduce una variación en frecuencia conocida como frecuencia doppler.
- *Longitud de onda (Frecuencia).* Cuando las ondas electromagnéticas penetran en un medio material, como puede ser el aire o un sólido, la longitud de onda de ésta varía, provocando una modificación en la frecuencia de la señal.

La onda electromagnética transmitida y/o recibida en la interfaz aérea variará aleatoriamente cuando se presente:

- *Reflexión.* Cambio de dirección de la OEM cuando ésta se encuentra con objetos más grandes que su longitud de onda
- *Difracción.* Fenómeno del movimiento ondulatorio en el que la onda se extiende después de pasar a través de pequeñas aberturas, alrededor de obstáculos o por bordes afilados.
- *Dispersión.* Fenómeno de separación de las ondas de distinta frecuencia al atravesar un material; ocurre cuando la OEM se encuentra con objetos más pequeños que su longitud de onda
- *Propagación Multitrayectoria.* Son aquellas reflexiones, difracciones, y atenuaciones causadas por objetos o construcciones (e.g. edificios, montañas) que provocan la repartición de la energía de un símbolo (o bit) mediante varios caminos, arribando en diferentes intervalos de tiempo al receptor determinado. Dicha repartición se conoce como “Retardo de dispersión”.
- *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. Esto provoca que los símbolos modulados que van montados en la señales se traslapen unos con otros, provocando así el efecto *Inter Symbol Interference* (ISI).

## 2.3 Arquitectura de sistemas de telefonía celular

Para conocer la organización de los sistemas celulares es necesario subdividir y agrupar los elementos de acuerdo a su función. Es por eso que de manera general, los tres grandes bloques que constituyen cualquier arquitectura de sistema de telefonía celular son los siguientes:

**Core Network (CN):** Región del sistema responsable de controlar el acceso a los servicios, la movilidad, y sesiones de datos. El CN está encargado de realizar la interconexión con redes externas (e.g. Internet, redes privadas)

**Radio Access Network (RAN):** Sección designada para el establecimiento de la conexión entre el UE y el CN. Responsable de manejar los recursos de radio del sistema.

**User Equipment (UE):** Elemento que es dividida en dos componentes; *mobile termination* (MT), que maneja todas las funciones de comunicación, y el *terminal equipment* (TE) que es hacia donde se dirigen todas las tramas de información. El UE contiene una *universal integrated circuit card* (UICC), que es una tarjeta inteligente, coloquialmente llamada tarjeta SIM. Corre una aplicación conocida como el *universal subscriber identity module* (USIM) que almacena información específica del usuario (i.e. número telefónico de usuario e identidad de red local).

En la figura 2.4 se ejemplifica en arquitecturas GSM, UMTS, y LTE, la generalidad que existe para los segmentos en los que se divide el sistema de telefonía celular.

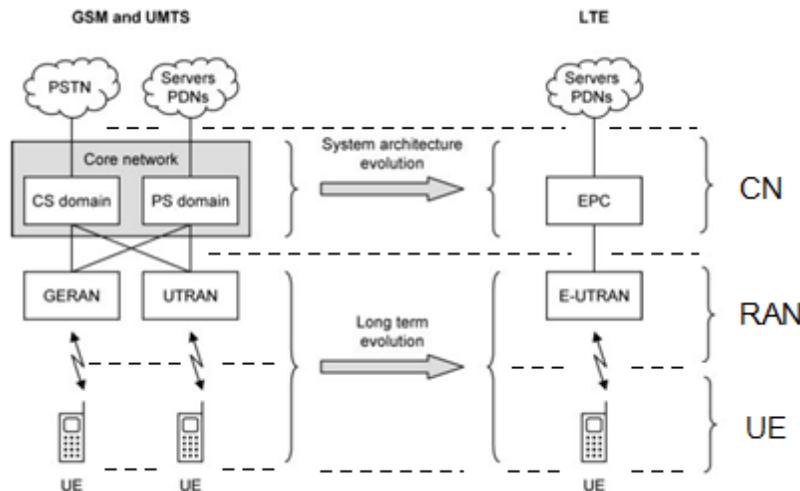


Figura 2.5 Arquitectura GSM/UMTS y LTE/SAE.

## 2.4 Arquitectura de redes LTE

El sistema EPS está conformado por el *Evolved Packet Core* (EPC) y *Evolved UTRAN* (E-UTRAN). EPC provee acceso a redes de datos externas (e.g. Internet, redes corporativas) y servicios de operadores. Realiza funciones relacionadas a la seguridad (autenticación, acuerdo de llaves), información de suscriptor, cargos por servicio, y acceso móvil entre diferentes tecnologías (GERAN/UTRAN/E-UTRAN/I-WLAN/CDMA2000 etc.) [8].

- El CN (llamado EPC en el sistema) registra la movilidad de terminales inactivos (i.e. terminales en estado de ahorro de energía). Se compone por el *Mobility Management Entity* (MME), el *Serving Gateway* (S-GW) y el *PDN Gateway* (P-GW), quienes generalmente se encuentran físicamente en el mismo lugar y es por eso que se asocian como una sola entidad aunque sean dispositivos independientes, así como otros elementos que funcionan como bases de datos o posibilitan la interconexión a redes de generaciones precedentes.
- La zona de RAN (denominada E-UTRAN en el sistema) desempeña todas las funciones relacionadas a enlace de radio para las terminales activas (i.e. terminales en intercambio de datos); primer acceso a la red mediante eNBs, handover, radio bearers (portadores de información sobre la interfaz de radio), entre otros. Se compone de *eNB* (evolved Node B).

Entre EPC y E-UTRAN existe una interfaz llamada **S1**, que usa como protocolo de transporte **GTP** (GPRS Tunneling Protocol), y para la interconexión de eNBs existe una interfaz llamada **X2**.

La figura 2.5 muestra un esquema simplificado de la arquitectura EPS.

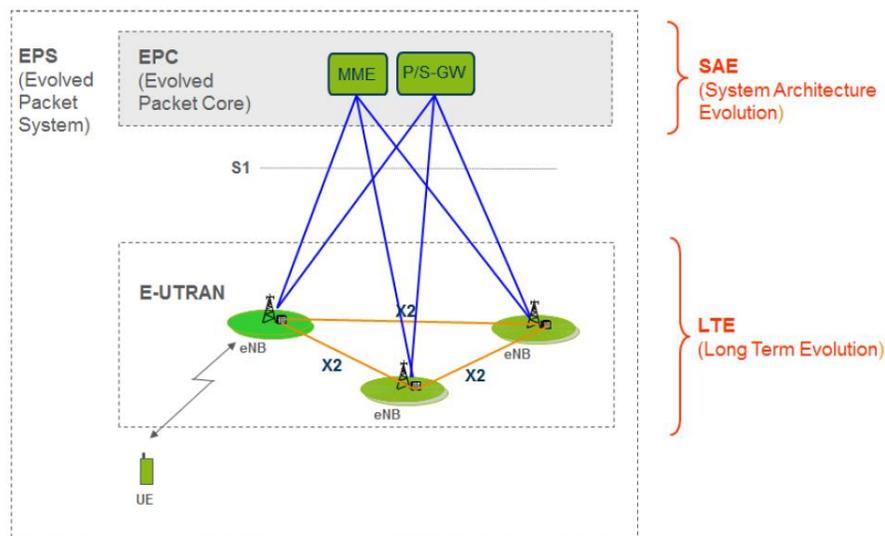


Figura 2.6 Arquitectura EPS. [8]

## 2.5 Arreglos MIMO

Las especificaciones de LTE soportan el uso de *Multiple Input Multiple Output* [11], arreglo que refiere una técnica de transmisión y recepción a través del uso de múltiples antenas en el eNodeB y en el UE.

Entre las ventajas de la utilización de este arreglo está la reducción del desvanecimiento en frecuencia por la propagación multitrayectoria así como la mejora de calidad de señal aumentando la potencia de la misma. La implementación de MIMO mejora las tasas de datos por aprovechar el uso del canal inalámbrico al implementar canales de transmisión en paralelo.

En los primeros ‘releases’ de LTE, el eNodeB estaba equipado con dos antenas de transmisión y el UE con dos antenas de recepción. En un ambiente de radio pobre, las dos antenas del eNodeB están destinadas a mandar la misma información en diferentes frecuencias para mejorar la recepción en el UE; en esta instancia, se utiliza la técnica MIMO de ‘Diversidad de transmisión’. En un ambiente de radio óptimo, cada antena transmisora del eNodeB será usada para transmitir información diferente al UE; este tipo de técnica MIMO es llamada ‘Multiplexión espacial’, técnica que logra un incremento en el throughput.

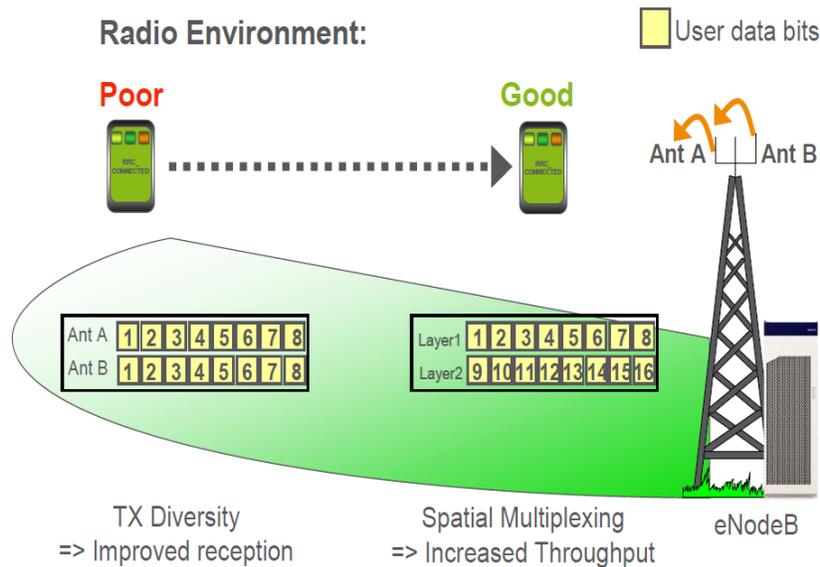


Figura 2.7 Técnicas MIMO de acuerdo al tipo de ambiente de radio. [8]

La separación entre antenas es una característica decisiva para el arreglo del sistema, pues es ésta distancia quien se relaciona con la frecuencia del canal utilizado para la transmisión y recepción de información. De esta forma, en el eNodeB, el número de antenas se ve definido por el parámetro  $N \times M$ , donde  $N$  antenas son usadas para la transmisión y  $M$  antenas para la recepción.

Para mantener una baja complejidad en el equipo de usuario (UE), en *Releases* 8/9 no se especifica MIMO en *uplink* para LTE y este sólo cuenta con una antena de transmisión (se busca un bajo consumo de energía en el UE para que sea factible la movilidad) lo que limita el uso de técnicas MIMO únicamente al enlace de *downlink* [12].

## 2.6 Protocolos en plano de usuario y plano de control

Para definir los protocolos, es necesario definir la existencia de dos planos; el plano de usuario y el plano de control. El plano de usuario está conformado por la información que el usuario solicita o envía, así, los protocolos en este plano son responsables de que dicha información tenga un traslado adecuado a través del EPC. En la contraparte, el plano de control es usado para la señalización y procedimientos necesarios para que esa información solicitada por el usuario sea entregada o recibida según sea el caso.

En la figura 2.7, se ilustra el stack de protocolos en la comunicación entre el UE y un servidor externo a la red.

Se consideran al UE, eNB, SGW, y PGW como elementos que involucran el tratamiento de la información en el plano de usuario.

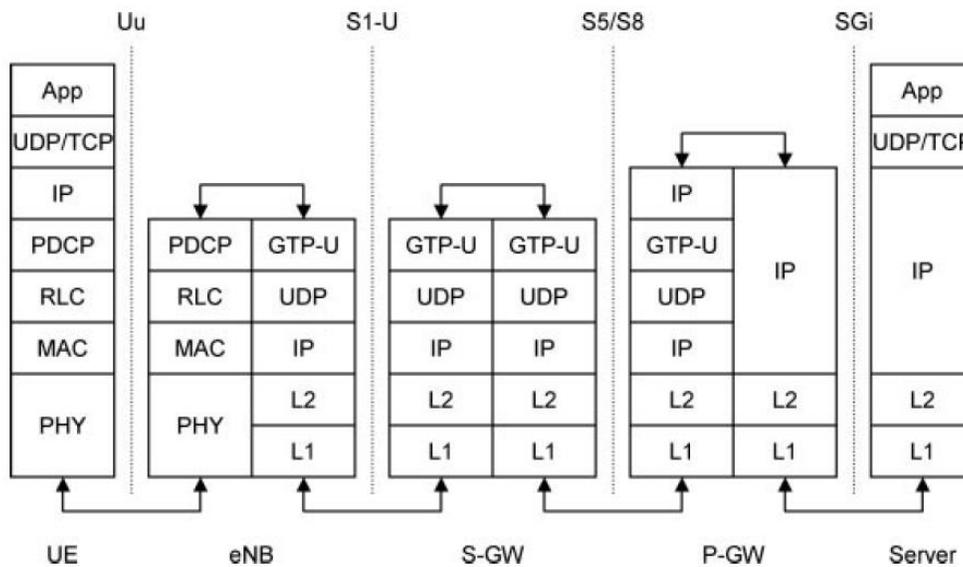


Figura 2.8 Protocolos entre UE y servidor externo con uso de S5/S8 (GTP). [9]

**Capa física:** en ella se maneja modulación y demodulación, técnicas de mapeo de antena múltiple y ofrece servicios a la capa MAC como canales de transporte y canales físicos.

**Capa de enlace de datos:** la capa 2 se desglosa en dos subconjuntos; *Radio Link Control* (RLC) [13] y *Medium Access Control* (MAC) [14]. Ambas son usadas para el transporte de la información del usuario y para la señalización del medio.

**Capa PDCP:** *Packet Data Convergence Protocol* [10] se encarga de la compresión y descompresión de la información del usuario. Adopta la segmentación y concatenación para adaptar la carga de información al tamaño del bloque de transporte.

**Capa IP:** el sistema se fundamenta en la conmutación de paquetes, es por eso que todas las interfaces entre nodos en el sistema están basadas en el protocolo IP.

**Capa de transporte:** el transporte de la información se realiza mediante UDP o TCP; La señalización se lleva a cabo mediante el protocolo SCTP.

**Capa de aplicación:** aquella que engloba todo el proceso de aplicaciones solicitadas por el usuario. Capa que está en contacto directo con el usuario final.

**Capa GTP-U:** *GPRS Tunneling Protocol-User plane* [3], protocolo de encapsulado encargado de multiplexar los paquetes IP de distintos usuarios para asignar a cada uno de ellos un identificador llamado *Tunnel End point Identifier* [8] (TEID), para poder ser localizado dentro del túnel que está asociado a un determinado EPS Bearer.

En la figura 2.8 se observa la comunicación entre UE, eNB, y MME. El MME es considerado un elemento puramente de control, de esta forma, se ilustran los protocolos en plano de control utilizados para establecer comunicación y procesar la información del usuario.

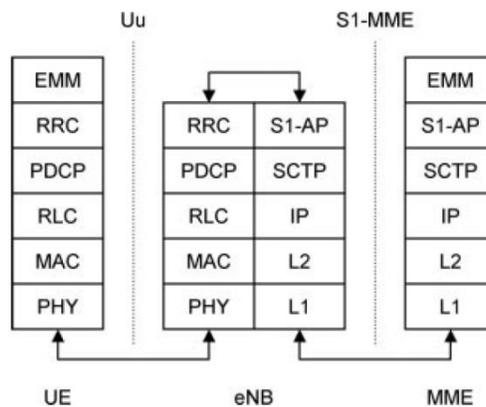


Figura 2.9 Stack de protocolos usados para mensajes de señalización NAS. [9]

**Protocolo EMM:** *EPS Mobility Management*, protocolo que desarrolla procedimientos de movilidad y de registro a E-UTRAN. Existen dos estados para este protocolo [12]: EMM\_DEREGISTERED (UE no registrado) o EMM\_REGISTERED (UE registrado).

**Protocolo RRC:** *Radio Resource Control* [15], responsable de realizar una conexión de control entre UE y eNB, para que el usuario sea capaz de acceder a los servicios proporcionados mediante el EPC y desde redes externas. Existen dos estados en este protocolo: IDLE y CONNECTED. Cuando el equipo está en modo idle, no se encuentra establecida la conexión RRC pero el UE es monitoreado por la red LTE. Cuando el UE está conectado puede hacer uso de los radio bearers, y por tanto, de los servicios que la suscripción le permita.

**Protocolo S1-AP:** *S1 Application Protocol* [16], responsable de manejar los EPS Bearers, funciones de movilidad para UEs activos con el fin de habilitar cambio entre eNBs o cambio entre tecnología de radio acceso (compatibilidad con generaciones precedentes), así como voice del UE para su localización dentro de un *Tracking Area* (TA). Tiene lugar en el eNB y el MME.

**Protocolo SCTP:** *Stream Control Transmission Protocol* [17], usado en plano de control para mensajes de señalización. Incluye control de flujo y congestión, permitiendo diversos caminos para la entrega de información entre los nodos involucrados, es más seguro que TCP pues utiliza un método denominado 4-way-handshake para para la verificación de asociación y autenticidad entre nodos.

## 2.7 Codificación en redes LTE

LTE soporta diferentes esquemas de codificación para la modulación y la corrección de errores, permitiendo así, aplicar un esquema diferente por usuario y por tipo de trama, todo basado en las condiciones del canal de transmisión.

AMC, Adaptive Modulation and Coding, es un mecanismo efectivo para maximizar el throughput en un canal que varía con el tiempo. El algoritmo de adaptación típicamente llama el uso del esquema de modulación y codificación más alto que puede ser soportado con base en el valor de ‘signal-to-noise’ y la interferencia medida en el receptor (UE) para que de esta manera, cada usuario sea provisto con la tasa de transmisión más alta posible de acuerdo a su respectivo enlace.

La corrección de errores se realiza generalmente de dos formas: *Automatic Repeat Request* (ARQ) o *Forward Error Correction* (FEC). La primera verifica cada bloque de datos recibido usando un código de detección de error, y si la verificación falla, se solicita una retransmisión de la información; repitiendo el proceso hasta que los datos sean verificados correctamente. La segunda técnica codifica el mensaje que se envía, así, el receptor es capaz de utilizar la redundancia que el código incluye para descifrar bajo un marco de “bit más parecido” la información que se envió.

Para LTE se combina la utilización de ARQ y FEC con el fin de que los errores de orden menor sean corregidos sin retransmisiones y que los errores de orden mayor sean corregidos a través de una petición de retransmisión. A esta técnica se le conoce como *Hybrid Automatic Repeat Request* (HARQ) [14].

**HARQ**

Como en cualquier sistema de comunicación, existen errores ocasionales de transmisión de datos, los cuales pueden ser causados por el ruido, la interferencia, y/o el *fading*. Los protocolos de capa de enlace de datos, de capa de red (IP), y de capa de transporte no están preparados para lidiar con bits en error dentro de los encabezados, y la mayoría de los protocolos tampoco son capaces de manejar errores en el apartado de *payload*. En este caso, las medidas explícitas del enlace de radio por sí solas no conforman una base confiable para la operación del mecanismo AMC, por tanto, es necesario un mecanismo complementario. Uno de los fundamentos del diseño de la capa MAC es el soporte del mecanismo HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*). HARQ es una técnica de corrección de errores que se ha convertido en una parte integral de la mayoría para los estándares de banda ancha inalámbrica. Distinto a las técnicas convencionales de ARQ, donde todas las transmisiones son decodificadas de manera independiente, las retransmisiones en el caso de HARQ son decodificadas de manera conjunta con el resto de las transmisiones para reducir la probabilidad de un error por decodificación.

Al ser el retraso por retransmisión y la señalización excedente los criterios más críticos, especialmente para aplicaciones de redes móviles, se ha elegido para LTE uno de los procedimientos de retransmisión más confiable llamado Stop-and-Wait (SAW). En SAW, el transmisor opera en el bloque actual hasta que se asegure una correcta recepción del bloque por parte del UE. Usa un mecanismo de reconocimiento optimizado y notifica para confirmar la correcta transmisión del paquete de datos mientras evita con esto, la retransmisión. Para evitar un retraso adicional debido al tiempo de espera, se emplea HARQ de N canales, acompañado de SAW para hacer paralelo el proceso de retransmisión, y con esto, evitar el desperdicio de tiempo y recursos. Entonces, mientras el protocolo HARQ está basado en un esquema de downlink asíncrono y en un esquema de uplink síncrono, el esquema combinado que se usa en redes LTE se basa en un método de redundancia incremental.

## 2.8 LTE-Advanced

Este estándar es una optimización del estándar LTE. Fue propuesto como sistema candidato de tecnología 4G a la ITU-T a finales del año 2009 luego de cumplir con los requerimientos del estándar IMT-Advanced [6]. Fue estandarizado por la *3rd Generation Partnership Project (3GPP)* en marzo de 2011 en el *Release 10*.

El objetivo principal está centralizado en un aumento de la capacidad. La tendencia del mercado está enfocada a adoptar un sistema LTE-Advanced- LTE Release 10 con mayores tasas de transmisión de la información a un bajo costo, y a la vez, cumplir con los lineamientos definidos por la ITU para IMT Advanced, también referido como 4G.

Las principales mejoras son enlistadas a continuación:

- ➔ Mayor tasa de datos pico; DL 3 GBps, UL 1.5 GBps
- ➔ Mayor eficiencia espectral. De un máximo de 16bps/Hz en el Release 8 a 30bps/Hz en Release 10.
- ➔ Incremento de número de suscriptores activos simultáneos.
- ➔ Optimización de desempeño en los límites de las células, (e.g. para DL 2x2 MIMO al menos un desempeño de 2.40 bps/Hz/célula)

Las principales funcionalidades nuevas introducidas en LTE-Advanced son:

- Carrier Aggregation (CA)
- Relay Nodes (RN) o nodos relevadores
- Optimización para uso de técnicas multi-antena

LTE-Advanced ha desarrollado la posibilidad de despliegues heterogéneos de la tecnología

- (A) Carrier aggregation
- (B) Spectrum aggregation
- (C) Transmisión en UL/DL multi-antena

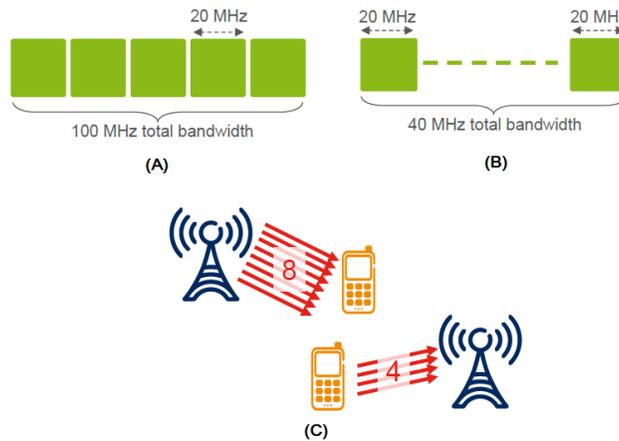


Figura 2.10 LTE-Advanced [8]

# CAPÍTULO 3

## PROTOCOLOS DE LTE

---

### 3.1 Introducción

En este capítulo se abordan los conceptos de codificación, modulación, el tipo de interfaz de radio, estructura de tramas, *scheduling*, entre otros. Estos elementos son importantes para entender que la capa física es la responsable de labores como la transmisión y recepción de información; necesaria para hacer llegar los servicios a los usuarios, así como permitir que éstos realicen solicitudes a la red para obtener determinada información o servicio.

La capa física ofrece servicio de transporte de datos a capas superiores. El acceso a los servicios es a través del uso de canales de transporte mediante el protocolo MAC. La capa física tiene comunicación con capa 2 y capa 3 a través del protocolo *Medium Access Control* (MAC) y el protocolo *Radio Resource Control* (RRC) respectivamente y en el ámbito de control. En la figura 3.1 se observa la relación, donde las elipses entre las distintas capas/subcapas representan *Service Access Points* (SAPs).

La capa física ofrece un canal de transporte al protocolo MAC. A su vez, el protocolo MAC ofrece diferentes canales lógicos al *Radio Link Control* (RLC), protocolo de capa 2. El canal de transporte es caracterizado por la manera en la que la información es transferida sobre la interfaz de radio, mientras un canal lógico es caracterizado por el tipo de información transferida.

Habiendo analizado la capa física de la interfaz de aire, se describirá la capa de enlace de datos para la misma interfaz (interfaz Uu), capa 2 del modelo OSI, donde se realizan funciones de *scheduling* [18], es decir, los procesos necesarios para que exista una adecuada asignación de recursos al usuario final de acuerdo a las solicitudes que éste pudiera hacerle a la red. Para la asignación de recursos son involucrados factores específicos, tales como la aplicación a la que trata de acceder el usuario, el tipo de enlace al que tiene acceso, la utilización, la prioridad del servicio, entre otros.

Se abordan los procesos asociados a capa de enlace de datos en LTE, desde la perspectiva del UE, y hasta la perspectiva del eNB. Se orientará a través de los tres protocolos de capa 2, analizando en consecuencia, la priorización que manejan los elementos de red para la asignación de recursos.

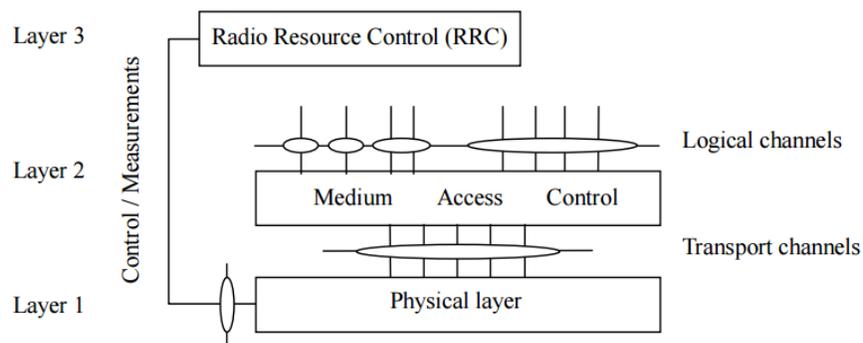


Figura 3.1 Arquitectura de protocolo para interfaz de radio alrededor de capa física [9]

### 3.2 Interfaz de radio LTE

La interfaz de radio está basada en OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) [11] para el enlace de DL y SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) [11] en UL; la elección de estas técnicas, reduce la interferencia inter-símbolo del sistema. Estas técnicas se ajustan adecuadamente para la operación con un ancho de banda flexible (i.e. desplegar la comunicación en seis anchos de banda distintos). Esto habilita la operación de LTE en diferentes regiones con diferentes bandas de frecuencia y anchos de banda disponible.

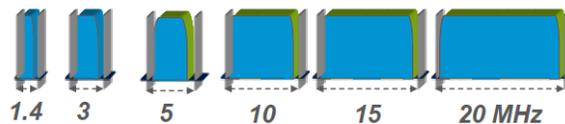


Figura 3.2 Ancho de banda flexible en LTE [8]

OFDM muestra un buen desempeño en ambientes de radio que presentan alta dispersión temporal (i.e. retardos significativos e intensos reflejos de la señal debido a efecto multitrayectoria). Esto es porque la transmisión de la información está distribuida sobre múltiples subportadoras. Cada subportadora tendrá entonces una baja tasa de transmisión de símbolo y por tanto, un largo tiempo de duración de símbolo. Esto se traduce como la reducción del *Inter Symbol Interference* (ISI).

La transmisión en el enlace ascendente (UL), SC-FDMA, tiene un *Peak to Average Power Ratio* (PAPR) mucho menor que OFDM, (i.e. el equipo no puede transmitir con altos niveles de potencia constantemente pues la batería del UE se consumiría con rapidez). Esta una de las razones por la que se escoge este tipo de técnica de acceso al medio desde que el amplificador de potencia en el UE se elabora a un bajo costo.

Sumado a lo anterior, LTE presenta la posibilidad de adaptar a nivel de ‘Capa 2’ el protocolo MAC de IEE 802.16 [19], los modos FDD (Frequency Division Duplex) y TDD (Time Division Duplex). En FDD se utilizan distintas bandas de frecuencia; una banda de frecuencia para UL y otra banda de frecuencia para DL. En TDD los enlaces de transmisión UL y DL son enviados en distintos intervalos de tiempo. La figura 3.2 ilustra lo mencionado.



Figura 3.3 FDD y TDD [8]

Los recursos de radio están definidos en los dominios de tiempo y frecuencia, y son divididos en los llamados ‘bloques de recursos’.

La adaptación del enlace, adapta el esquema de modulación y tasa de codificación a la condición variable del canal de radio.

Las transmisiones de radio LTE están basadas en un corto TTI (Transmission Time Interval), la duración de este TTI es de 1 ms, lo que acelera la operación de todas las funciones superiores. La corta duración del TTI también reduce la latencia de la interfaz de radio, que es uno de los factores a considerar en el desempeño de LTE.

### 3.3 Modulación en LTE

El tipo de modulación en LTE depende del ambiente de radio. El UE estima la calidad del enlace de bajada y lo señala de regreso al eNB (Uplink) en el *Channel Quality Indicator (CQI)* [11]. Las señales de referencia en el enlace de subida son usadas por el eNodeB para estimar la calidad en el enlace de subida. Es entonces que el eNB, con esta información, decide la técnica de modulación que debe ser usada habiendo identificado la calidad en la interfaz de aire.

LTE soporta las siguientes técnicas de modulación (para UL y DL) [20]:

- 64 Quadrature Amplitude Modulation (64 QAM)
  - Usa 64 diferentes combinaciones de cuadratura y amplitud para llevar 6 bits por símbolo.
- 16 Quadrature Amplitude Modulation (16 QAM)
  - Usa 16 diferentes combinaciones de cuadratura y amplitud para llevar 4 bits por símbolo.
- Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)
  - Usa 4 diferentes cuadraturas para mandar 2 bits por símbolo.

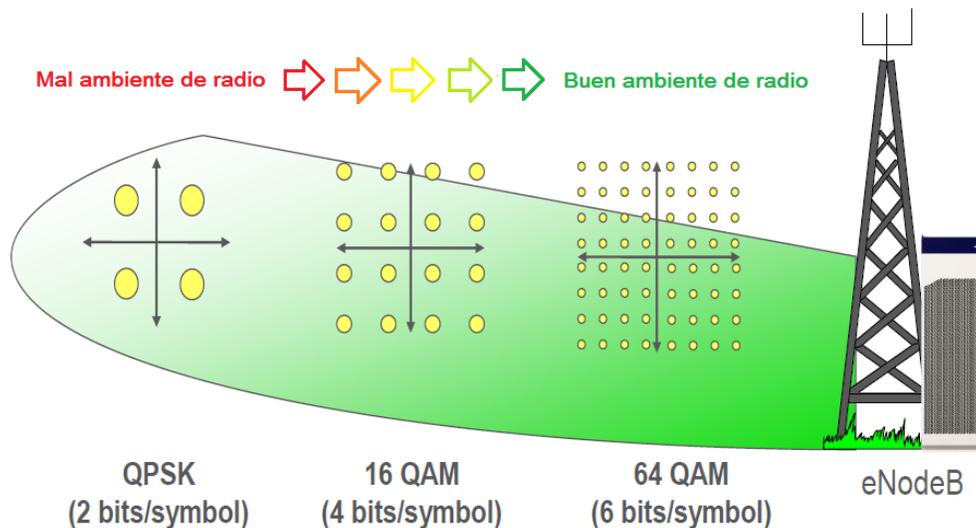


Figura 3.4 Modulación adaptativa [8]

El estándar LTE maneja algunos símbolos para mecanismos de control en el PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*), 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 el UE.

La tasa de codificación o *Code Rate* (Como se referirá más adelante) se ve representada como el número de bits de información entre el número de bits transmitidos.

### 3.4 OFDM

En entornos urbanos es común que existan múltiples trayectorias que influyan en la interferencia inter simbólica (ISI), por esto, es importante que la interfaz de radio se vea afectada al mínimo por dicho problema. OFDM ha sido la opción elegida para atacar este problema, además de que ya ha sido implementado en sistemas como WLAN y WiMAX [19]. 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.

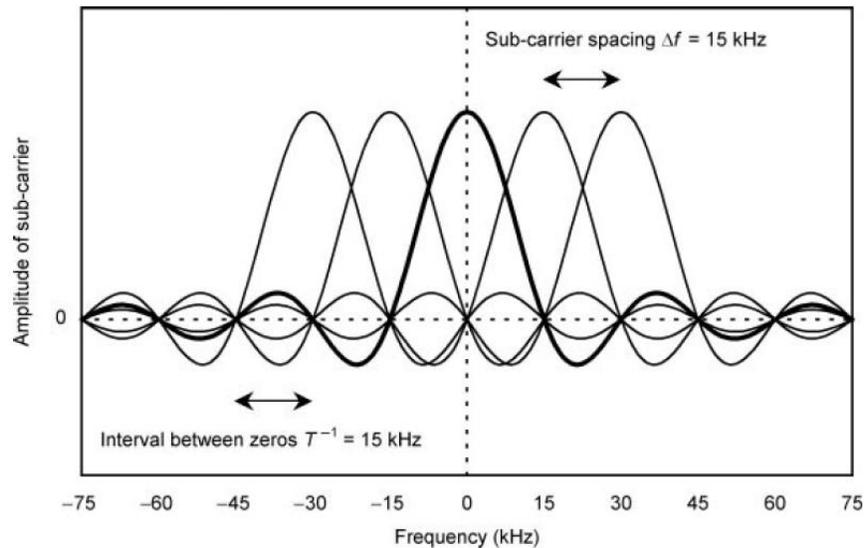


Figura 3.5 OFDM [21]

Con OFDMA y SC-FDMA, el espectro de RF está dividido en subportadoras que tienen un espaciado de 15 KHz cada una. Estas están agrupadas en conjuntos de 12; dichos conjuntos son conocidos como Bloques de Recursos (RB).

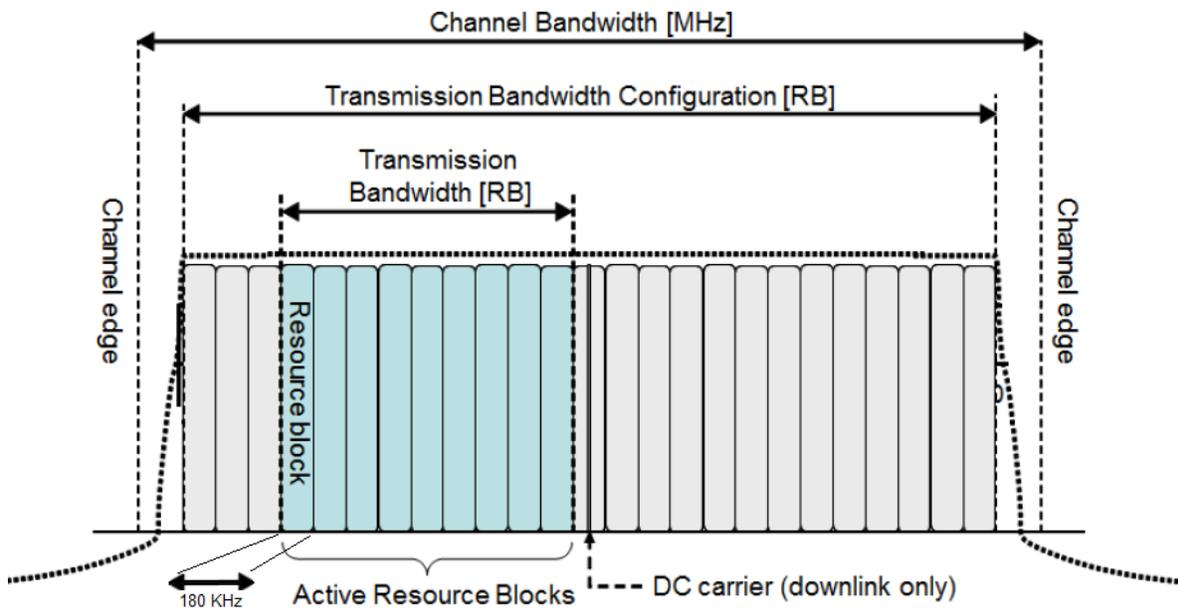


Figura 3.6 Distribución de ancho de banda de canal en LTE [22]

En la figura 3.3 se observa que ni la portadora de DC en el centro del ancho de banda, ni un ancho de banda predeterminado en las fronteras del canal en cuestión son considerados para la transmisión de información, lo que reduce el ancho de banda aprovechable para la información de usuario.

### 3.5 Bloque de recursos

En LTE, la información es organizada como una función de frecuencia y tiempo, usando una *red de recursos* (*Resource grid*). En la figura 3.5 se muestra la red de recursos para el caso de un prefijo cíclico normal (Existe una red de recursos similar para prefijo cíclico extendido, que usa seis símbolos por slot en lugar de siete). El concepto de prefijo cíclico se explicará en el apartado 3.6 del presente.

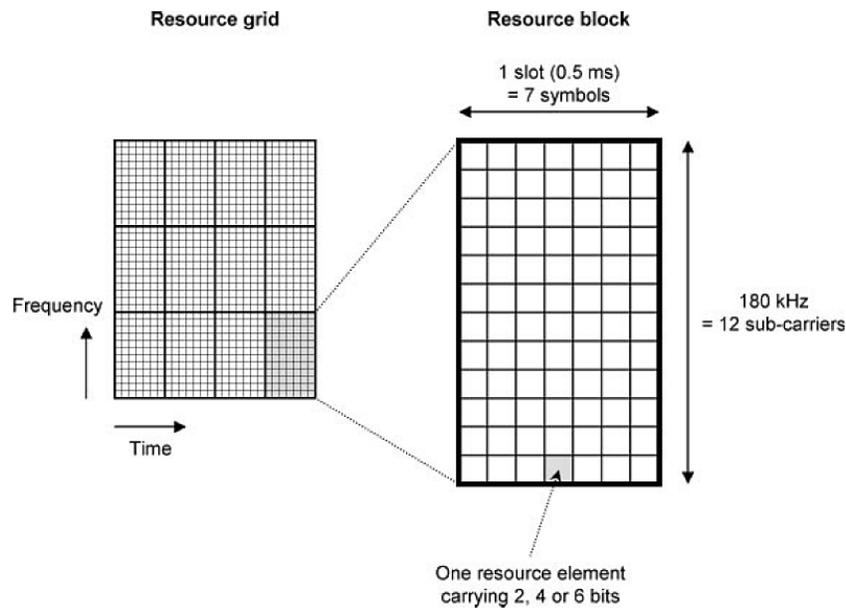


Figura 3.7 Resource Grid en dominio de frecuencia y tiempo (Con CP Normal) [21]

Para el dominio de frecuencia, y de acuerdo al tipo de técnicas de acceso al medio utilizadas en el sistema, se requiere de la agrupación de subportadoras; un bloque de recursos, entonces, representa la agrupación de 12 subportadoras. Cada RB (Resource Block) [23] ocupa un ancho de banda de 180 KHz, pues cada subportadora abarca 15 KHz cada una.

La unidad básica es un *elemento de recurso* (*Resource Element, RE*) [23], de tal forma, un RE abarca un símbolo por cada subportadora. Cada elemento de recurso usualmente transporta dos, cuatro o seis bits sobre el canal físico, dependiendo del esquema de modulación; QPSK, 16-QAM o 64-QAM. Los elementos de recursos son agrupados en bloques de recursos; así, la duración de un RB será de 0.5 ms (un *slot*).

Los *Resource Blocks* son la parte más pequeña en la que se puede dividir la información transmitida por el eNB.

Los RBs a utilizar estarán sujetos al ancho de banda que se utilice; la relación se muestra en la tabla 3.1

Ancho de banda total [MHz]	Número de RBs	Número de subportadoras	Ancho de banda ocupado [MHz]	Bandas de guarda usuales
1.4	6	72	1.08	2 x 0.16 MHz
3	15	180	2.7	2 x 0.15 MHz
5	25	300	4.5	2 x 0.25 MHz
10	50	600	9	2 x 0.5 MHz
15	75	900	13.5	2 x 0.75 MHz
20	100	1200	18	2 x 0.1 MHz

Tabla 3.1 Relación RBs con BW

### 3.6 Estructura de trama

Los recursos físicos del sistema en dominio del tiempo pueden estructurarse de dos distintas formas (descritas a continuación) de acuerdo al modo en el que se trabaje; FDD o TDD.

Es importante señalar que la duración de una trama es de 10 ms. Cada trama está dividida en diez subtramas, cada una con duración de 1 ms, y a su vez, cada subtrama está dividida en dos slots, cada slot con una duración de 0.5 ms.

#### Estructura de trama tipo 1

Estructura que es válida para sistemas que utilizan duplexado por división de frecuencia (FDD) [7] y aplica al enlace de DL y al enlace de UL. El eje temporal se divide en tramas de 10 ms, quien a su vez está compuesta por 20 ranuras temporales (*slots*) cuya duración es 0.5 ms.

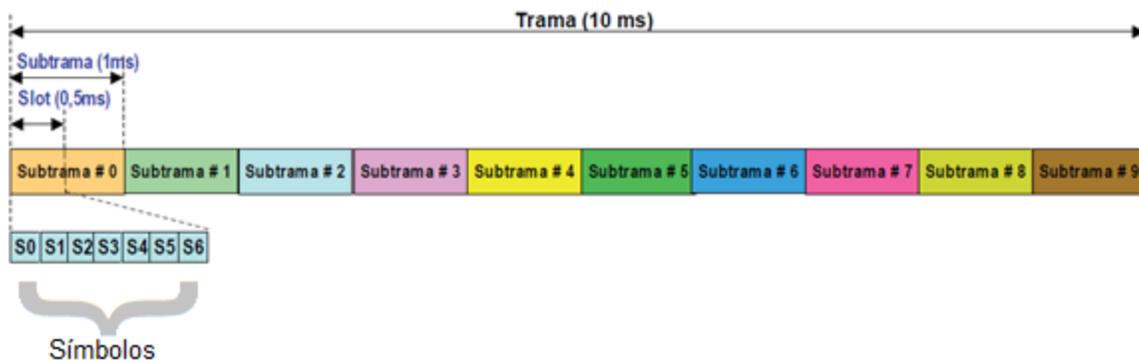


Figura 3.8 Estructura de trama tipo 1 [21]

### Estructura de trama tipo 2

Constituida para operar en modo TDD [7], el eje temporal se divide en tramas de 10 ms. Cada trama a su vez está compuesta por 10 subtramas, cada una con duración de 1 ms. Dicho tipo de trama contiene subtramas de transmisión para enlace descendente, enlace ascendente, y subtramas especiales. Las subtramas especiales tienen una duración variable, dependiendo de la configuración que se les asigne (véase figura 3.10), y contienen símbolos para sincronía de enlaces de DL y UL.

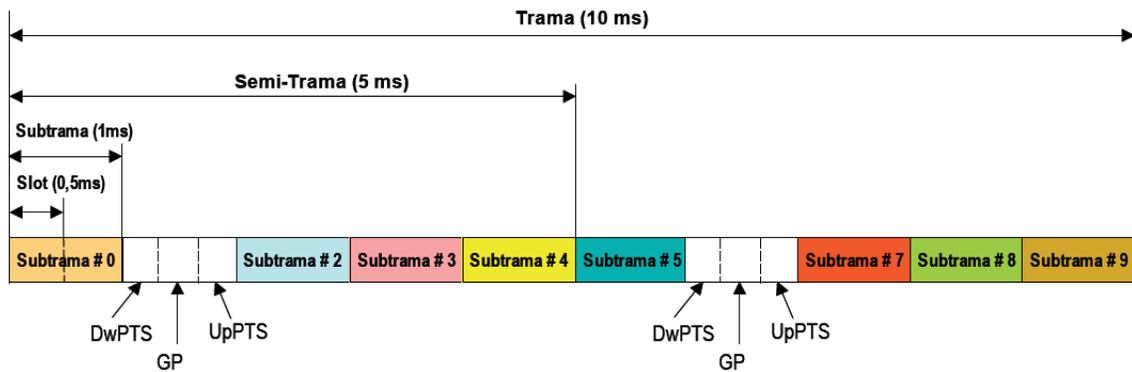


Figura 3.9 Estructura de trama tipo 2 [21]

La subtrama especial aparece con fines de sincronización y tiene una configuración variable, donde se pueden distinguir tres campos [7]:

- **DwPTS:** *Downlink Pilot Signal*, estos símbolos OFDM se utilizan para ubicar la señal de sincronización para el enlace de DL.
- **GP:** *Guard Period*, es el periodo de transición entre el modo de enlace ascendente y enlace descendente.
- **UpPTS:** *Uplink Pilot Signal*, se utiliza para transmitir un preámbulo corto. Su duración máxima es de dos símbolos OFDM.

Configuración de Subtrama Especial	Longitud en símbolos OFDM de Prefijo Cíclico Normal			Longitud en símbolos OFDM de Prefijo Cíclico Extendido		
	DwPTS	GP	UpPTS	DwPTS	GP	UpPTS
0	3	10	1	3	8	1
1	9	4				
2	10	3				
3	11	2				
4	12	1	2	3	7	2
5	3	9				
6	9	3				
7	10	2				
8	11	1				
				-	-	-

Tabla 3.2 Configuración de la subtrama especial

Existen siete combinaciones diferentes para la ubicación de las diferentes subtramas, tal como se muestra en la figura 3.10. Se observa que la ‘Subtrama #0’ y la ‘Subtrama #5’ son siempre para la transmisión del enlace de DL, mientras la ‘Subtrama #1’ es siempre una subtrama especial.

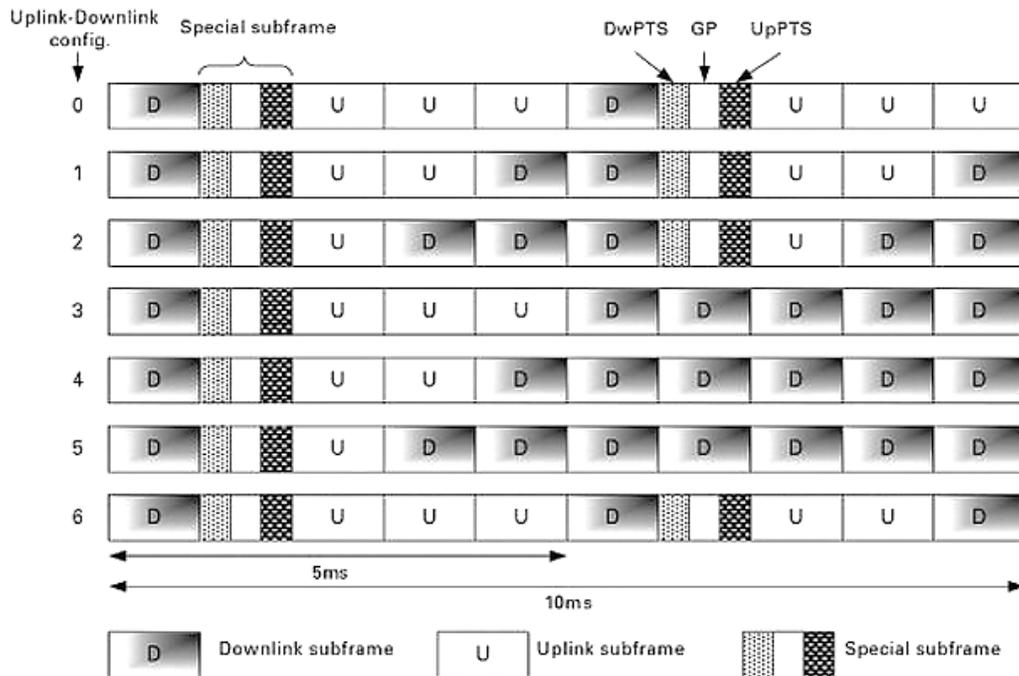


Figura 3.10 Configuración de UL-DL para estructura de trama tipo 2 [24]

Para el envío de cada símbolo, en el dominio de tiempo se hace uso del prefijo cíclico (*Cyclic Prefix, CP*), que es una copia de la última parte del mismo símbolo. Es usado para remover el ISI facilitando al receptor la identificación de puntos de finalización del símbolo para una adecuada correlación entre la información recibida. Si se utiliza un CP más largo que el retardo por dispersión (causado por propagación multitrayectoria), cada reflejo de la señal será visto por el receptor como el mismo símbolo que se está transmitiendo, como se indica en la siguiente figura.

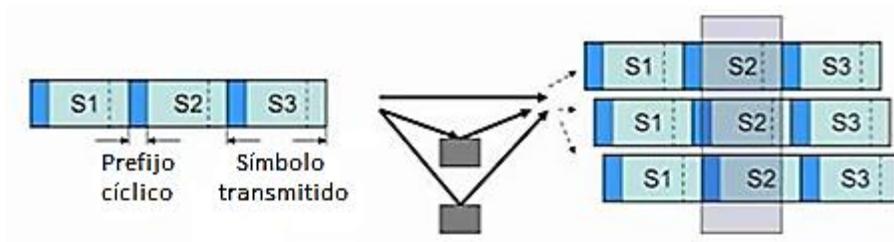


Figura 3.11 Prefijo cíclico

### 3.7 Enlaces ascendente y descendente.

Desde que hay 12 subportadoras por Bloque de recursos (RB) y 14 símbolos por subtrama, el enlace de DL puede transmitir (12x14) 168 símbolos cada milisegundo para cada RB en el ancho de banda del sistema.

Para el manejo de estos símbolos, se describen a continuación las señales físicas que permiten la correcta demodulación y la propia sincronización entre el UE y la red [21].

#### Enlace descendente

##### ➤ Señales de referencia (RS)

Señales de referencia o símbolos piloto son usados para:

- Obtener medidas de calidad en el enlace de DL
- Implementar mecanismos de búsqueda de celda y sincronización inicial
- Ser situadas en los RBs en dos grupos: primarias y secundarias

##### ➤ Señal de sincronización (SCH)

Utilizada para facilitar los procesos de sincronización temporal (a nivel de trama y subtrama). Es desglosada en:

- P-SCH (Primary SCH), que permite la sincronización temporal a nivel de subtrama, correlacionando la señal recibida con una de referencia almacenada en el receptor.
- S-SCH (Secondary SCH), permite la sincronización temporal a nivel de trama, utilizando la misma metodología de correlación temporal

➤ **Canales físicos de tráfico**

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

Este canal habitualmente transmite información del plano de usuario. Contiene la información entregada por la subcapa MAC a través del canal de transporte *Downlink Shared Channel* (DL-SCH). No es un canal dedicado (i.e. sólo se asigna al usuario cuando éste tiene algo que recibir en el enlace de DL luego de la gestión de recursos del enlace)

- **Physical Multicast Channel (PMCH)**

El canal PMCH se utiliza para transportar información MBMS (Multimedia Broadcast and Multicast System) para servicios de broadcast multimedia y servicios multicast.

➤ **Canales físicos de control**

- **Physical Broadcast Channel (PBCH)**

Este canal transporta información básica sobre la red (e.g. ancho de banda del canal, tipo de duplexación, número de identificación de trama). El canal no necesita de señalización explícita para ser demodulado y se puede codificar a partir de una sola recepción.

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

El canal PDCCH transporta los llamados *Downlink Control Information* (DCI), que incluyen información sobre la asignación de recursos para los canales de aviso (PCH) y de tráfico compartido (DL-SCH). También transporta información sobre los mecanismos de retransmisión de *Hybrid ARQ*.

- **Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)**

El canal le informa al UE sobre el número de símbolos (1, 2, 3) utilizados para transmitir el canal PDCCH a través del parámetro *Channel Format Indicator* (CFI). Dicho parámetro se transmite en cada una de las subtramas, siempre en el primer símbolo.

- **Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH)**

Transporta los mensajes de *Acknowledge* (ACK/NAK) para implementar el mecanismo de *HARQ* en el enlace ascendente. Cada canal de este tipo puede contener información de hasta ocho usuarios.

## **Enlace ascendente**

### ➤ **Señales de referencia (RS)**

Se definen dos tipos de señales de referencia para el enlace ascendente:

- Señales DM-RS (DeModulation Reference Signal). Empleadas para la detección y demodulación en el enlace ascendente, y están asociadas a la transmisión de paquetes PUSCH o PUCCH.
- Señales SRS. usadas para conocer el comportamiento del canal en el dominio de la frecuencia y facilitar los algoritmos de gestión de recursos

### ➤ **Canales físicos de tráfico**

- **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 físicos de control**

- **Physical Uplink Control Channel (PUCCH)**

Contiene información de control del enlace ascendente. En particular transmite: Peticiones de asignación de recursos (Scheduling Request); reconocimientos (ACK/NACK) correspondientes al enlace descendente, información de la calidad del canal (Channel Quality Indicator-CQI).

- **Physical Random Access Channel (PRACH)**

Canal físico de acceso aleatorio. Envía un preámbulo para iniciar, por parte del UE, el procedimiento de conexión al sistema.

### 3.8 Protocolos y uso de canales en capa de enlace

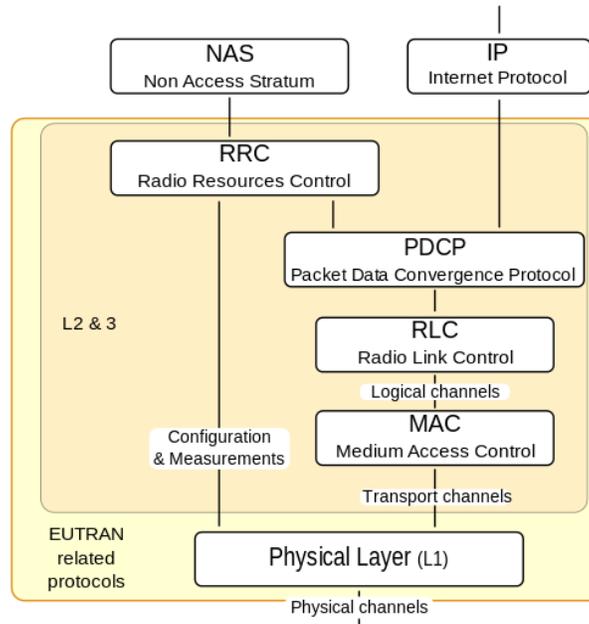


Figura 3.12 Jerarquía de protocolos en capa 2

Como se observa en la figura 3.12, existen tres protocolos responsables de desarrollar las tareas de la capa de enlace de datos: el protocolo MAC, el protocolo RLC, y el protocolo PDCP [15].

#### PDCP

*Packet Data Convergence Protocol* [25], soporta tramas de datos que usan un modo de *acknowledge* desde el protocolo RLC para asegurar que ninguno de los paquetes se pierdan durante un handover. Maneja tres funciones de la interfaz de aire: la compresión del encabezado, cifrado, y la protección de la integridad. PDCP sólo es usado mediante canales de tráfico y control.

El protocolo PDCP realiza lo siguiente:

- Emplea ROHC (Robust Header Compression) [26] para comprimir y descomprimir los encabezados de paquetes IP. De 40 Bytes por cada encabezado típico de paquete IP, se hace una reducción a un tamaño de 2 o 3 Bytes.
- Cifrado de la información de tráfico a través de una clave de 128 bits
- Función de ordenamiento de paquetes y detección de duplicación de paquetes provenientes del protocolo RLC.

## RLC

*Radio Link Control* [13], mantiene la conexión de capa 2 entre el UE y el eNodeB, asegurando una entrega confiable para las tramas de datos que deben alcanzar adecuadamente al receptor. Es responsable del manejo de los paquetes IP comprimidos, así como de la solicitud de retransmisión de estos cuando se reciban errores. Es encargado de la eliminación de paquetes duplicados.

Puede ser configurado de tres modos:

- **Acknowledged mode (AM):** utilizado para solicitar la retransmisión de paquetes perdidos mediante el mecanismo ARQ (Automatic Repeat Request) aplicado a los canales lógicos. Utilizado en aplicaciones que requieren fidelidad de entrega (e.g. navegación web, e-mail).
- **Unacknowledged mode (UM):** utilizado en tramas de datos en el canal de tráfico dedicado. Es empleado en aplicaciones sensibles al retardo (e.g. VoIP, video llamadas), pues detecta errores pero no los corrige.
- **Transparent mode (TM):** es el modo más sencillo de operación en el protocolo RLC, pues retransmite la información sin agregar información de encabezados referente a segmentación, secuencia, detección o corrección de errores. Utilizado para la difusión de información de aviso en la red.

El protocolo RLC tiene comunicación con el protocolo MAC mediante canales lógicos de tráfico y canales lógicos de control, los cuales se describirán a continuación [21].

### Canales lógicos de control

- **Broadcast Control Channel (BCCH)**

Canal de enlace descendente utilizado para difundir información del sistema hacia todos los UEs en una célula, con el fin de que cada uno de los usuarios conozca las características básicas del eNB en cuestión.

- **Paging Control Channel (PCCH)**

Canal de enlace descendente usado para notificar a los UEs en caso de tener una llamada entrante o de algún cambio relacionado al eNB

- **Common Control Channel (CCCH)**

Usado por ambos enlaces, ascendente y descendente, para proporcionar información de control en el establecimiento de una conexión entre el UE y el eNB

- **Multicast Control Channel (MCCH)**

Como su nombre refiere, es empleado para transmitir información de multicast en enlace descendente, es decir, involucra información de control desde el eNB y hacia un grupo de UEs que están ejecutando servicios MBMS.

- **Dedicated Control Channel (DCCH)**

Utilizado en ambos enlaces (UL y DL) para el control de la transmisión entre el eNB y el UE una vez que se ha establecido la conexión RRC.

### Canales lógicos de tráfico

- **Dedicated Traffic Channel (DTCH)**

Canal utilizado para ambos enlaces, ascendente y descendente, para transmitir información de tráfico (i.e. Información en el plano de usuario) en una conexión punto a punto.

- **Multicast Traffic Channel (MTCH)**

Canal de enlace descendente usado para notificar a los UEs en caso de tener una llamada entrante o de algún cambio relacionado al eNB

### MAC

*Medium Access Control* [14] realiza el ‘scheduling’ o calendarización de las transmisiones sobre la interfaz de aire, desempeñando funciones de detección y corrección de errores mediante mecanismos basados en HARQ, solicitando la fracción de información que contiene errores, a diferencia de ARQ, quien solicitaba un reenvío de todo el bloque de datos. El mecanismo HARQ es aplicado en los canales de transporte, canales que permiten la comunicación de la capa física al protocolo de capa 2 MAC. El protocolo gestiona también la prioridad entre canales lógicos (comunicación entre protocolo RLC y protocolo MAC) de un UE.

Los canales de transporte se clasifican en:

- Canales de transporte de UL
- Canales de transporte de DL

### Canales de transporte de UL

- **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)**

Utilizado para enviar peticiones de acceso a la red y para mensajes cortos de señalización

### Canales de transporte de DL

- **Broadcast Channel (BCH)**

Empleado para el envío de información del eNB a los UE. Contiene los parámetros básicos del sistema y es usado para identificar al operador que brinda el servicio.

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

Gestiona información de tráfico (plano de usuario) y de señalización (plano de control). Representa el canal principal para la información en el plano de usuario desde el eNB y hasta el UE.

- **Paging Channel (PCH)**

El canal es utilizado para transmitir información en toda el área de cobertura del eNB, siendo un canal de voz, sirve para informar a los UEs sobre actualizaciones referentes a la configuración de la red a la que se accede.

- **Multicast Channel (MCH)**

Es utilizado para soportar el servicio MBMS (Multicast Broadcast Multimedia Service) llevando información en el plano de usuario mientras éste ejecute alguna aplicación de MBMS (e.g. TV móvil).

La relación existente entre los canales de transporte (i.e. aquellos que permiten la comunicación entre la capa física y el protocolo MAC de capa 2) y los canales lógicos (quienes comunican el protocolo MAC con el protocolo RLC), es denominada ‘mapeo de canales’, dicha relación para enlaces de DL y UL es mostrada en las figuras 4.2 y 4.3 respectivamente.

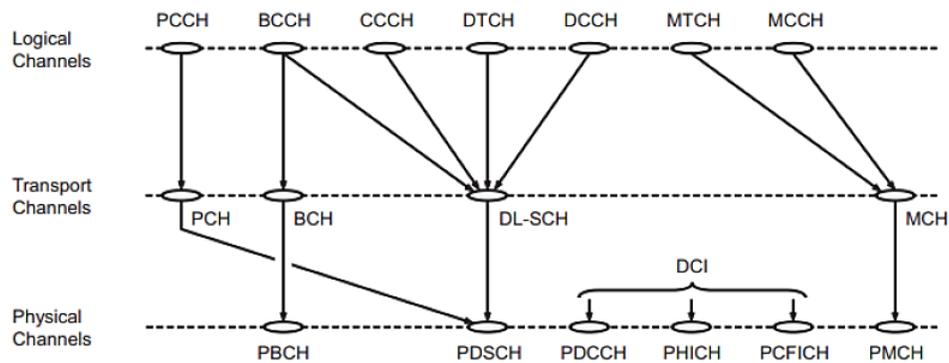


Figura 3.13 Mapeo de canales en DL [9]

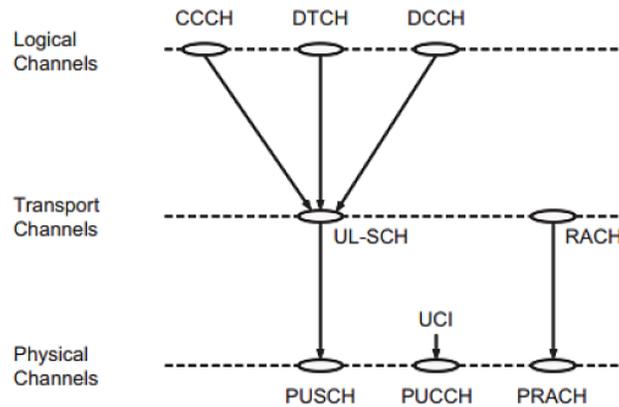


Figura 3.14 Mapeo de canales en UL [9]

Como es posible observar en los esquemas anteriores, cada protocolo requiere de canales que le permitan comunicarse con otros protocolos para habilitar el traslado adecuado de la información de control y de tráfico. Lo anterior es posible mediante el agregado de encabezados; cada protocolo agrega su propio encabezado (o lo retira, si se habla del proceso inverso) y lo traslada mediante el canal correspondiente al siguiente protocolo para que éste realice el mismo procedimiento. Esto se visualiza en la siguiente figura:

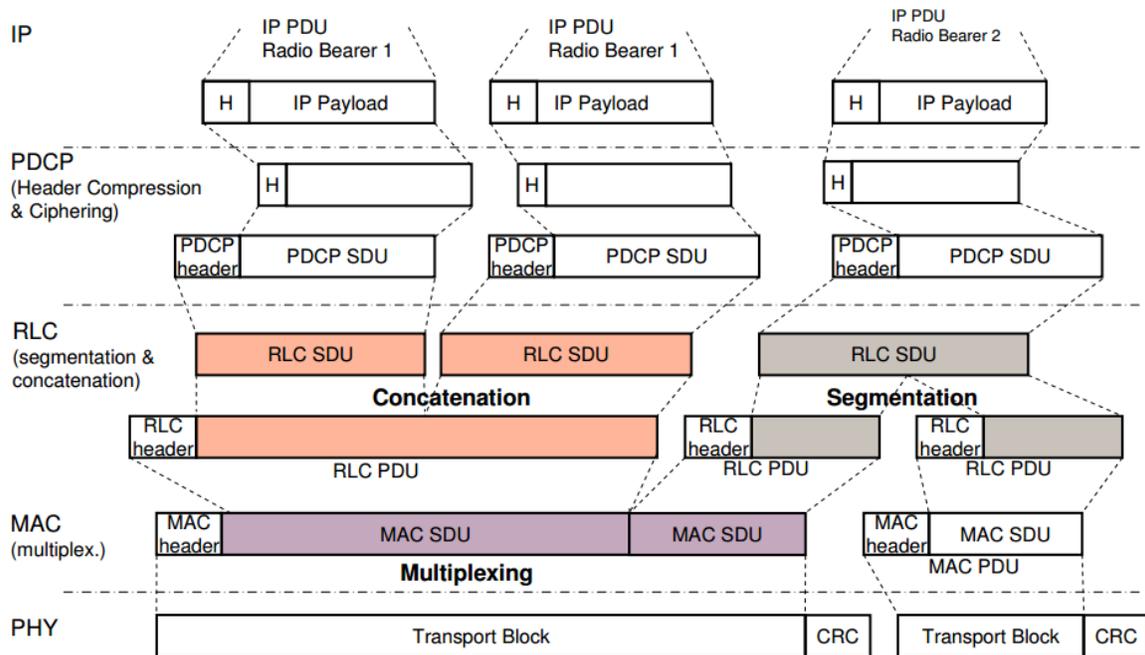


Figura 3.15 Agregado de encabezados [26]

### 3.9 Scheduling

Se define al *scheduling* como el mecanismo responsable de asignar de manera eficiente los recursos de radio a los UEs que solicitan un servicio. De tal forma, el eNB realiza este proceso llevando a cabo un algoritmo, basado en la información disponible en el momento (i.e. estado de canal en término de SNR, y requisitos de QoS), que le permite decidir el contenido de cada solicitud para enlace de DL y la capacidad de otorgar ‘permisos’ a los UE en el enlace de UL. El *scheduling* se lleva a cabo en el protocolo de capa 2 MAC, a través de los canales de transporte UL-SCH y DL-SCH.

Esta función discierne en qué subtrama (cada 1 ms) y cuántos PRBs se asignarán a un determinado UE para realizar la transmisión o recepción de acuerdo a las condiciones particulares de su enlace.

#### Scheduling en DL:

Cada terminal informa al eNB de la determinación de calidad en el canal mediante señales de referencia para que el eNB determine una asignación óptima de recursos. Las señales de referencia no están asociadas con la transmisión de datos en UL, y son únicamente para información de calidad en el enlace. De esta manera, el eNB decide el formato de transporte y el tamaño del bloque de transporte. La decisión de scheduling se envía a cada terminal a través del canal PDCCH, donde se detalla, para cada PRB, la identidad de la terminal al que se le ha asignado dicho PRB, así como la información necesaria para que el UE pueda decodificar el bloque de transporte.

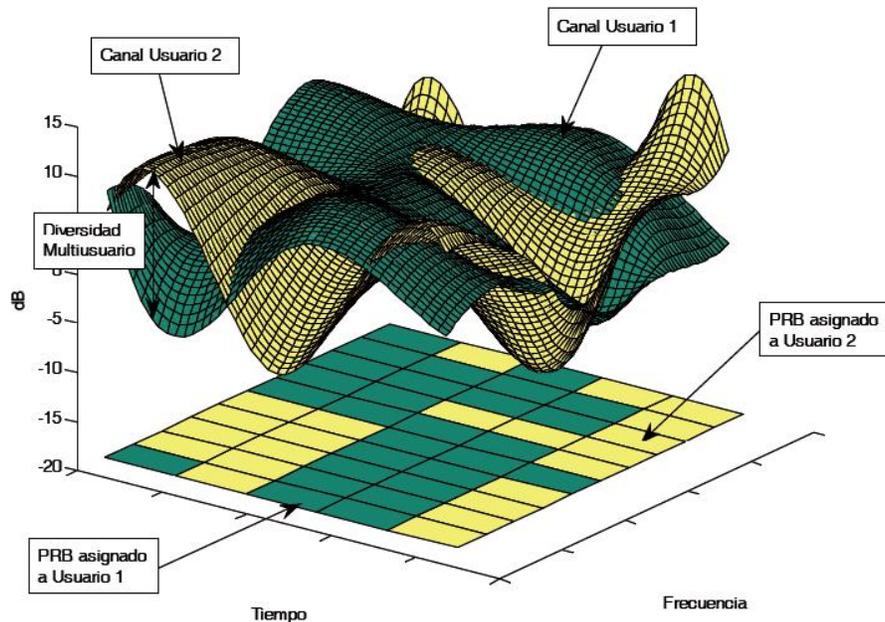


Figura 3.16 Scheduling para DL [8]

### **Scheduling en UL:**

Para el mecanismo de scheduling en UL, el eNB reconoce a los UEs que se encuentran transmitiendo en el canal físico PUSCH, identificando la subtrama y el PRB que ocupan. Considerando la técnica de acceso usada para el enlace ascendente (SC-FDMA), los PRBs asignados a cada UE deben ser contiguos en el dominio de la frecuencia. El *uplink scheduler* se encarga de seleccionar el formato de transporte (Transport Format, TF) que cada UE debe usar, basado en la disponibilidad de potencia y el estado del buffer de la terminal. Los acuerdos de TF entre el eNB y la terminal se establecen mediante el canal PDCCH.

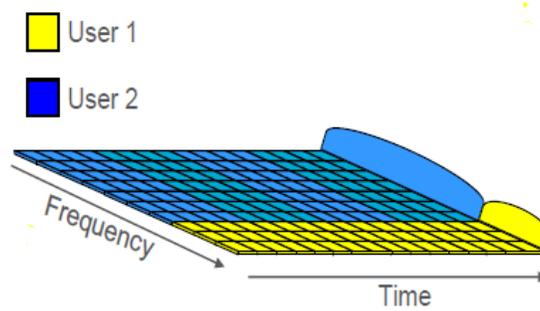


Figura 3.17 Scheduling para UL [8]

# CAPÍTULO 4

## DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE VOZ SOBRE LTE

---

### 4.1 Introducción

Uno de los incentivos hacia el desarrollo de LTE era la migración hacia un entorno *All-IP*, entorno en el cual no existe la utilización de conmutación de circuitos. Los nodos del núcleo para CS (MGW, MSC-S) permiten la provisión de servicios basados en conmutación de circuitos tales como servicios de voz, pero en la red LTE dichos nodos no existen.

Lo que quiere decir que los servicios de voz no pueden ser soportados en LTE de la manera convencional. Es así que los servicios de voz pueden prestarse a través de un subsistema responsable de la gestión de multimedia basada en el protocolo IP: IMS (IP Multimedia Subsystem). También es posible hacer uso del legado de sistemas existentes (2G y 3G) al ejecutar un retroceso al uso de redes que trabajan con conmutación de circuitos: 'Circuit Switch Fallback' (CSFB).

Voice over LTE (VoLTE) [27] es una iniciativa de GSMA (GSM Association) que establece el uso de IMS para proveer los servicios de voz sobre la red basada en conmutación de paquetes LTE/EPC.

## 4.2 Diseño y topología de red

El subsistema de multimedia IP (IMS), es una red 3GPP separada del sistema LTE/SAE, y que se comunica con la parte de EPC (dominio PS), UMTS (dominio CS), y GSM (dominio CS) para poder controlar servicios de multimedia en tiempo real basados en IP, como lo es la voz sobre IP.

La figura 4.1 muestra una versión simplificada del subsistema IMS y su relación con LTE; los componentes más importantes son los llamados *Call Session Control Function* (CSCF) [27], y de los cuales existen tres tipos:

- **Serving CSCF (S-CSCF)** [27]: controla la sesión de la terminal móvil. Cada móvil que utilice el sistema para la obtención de algún servicio de voz estará registrado en un S-CSCF, quien establece las llamadas con otros dispositivos y es responsable de contactar al UE si éste tiene una llamada entrante
- **Proxy CSCF (P-CSCF)** [27]: es el primer punto de contacto del UE con la red IMS. Comprime los mensajes de señalización que el móvil intercambia con IMS a fin de reducir la carga en la parte de transporte de la red LTE. También provee seguridad a dichos mensajes a través de encriptación y protección de la integridad en el enlace.
- **Interrogating CSCF (I-CSCF)** [27]: es utilizado como redireccionador en el proceso de registro del UE en la red IMS. Es responsable de dirigir al UE con el S-CSCF que le brindará el servicio que solicita

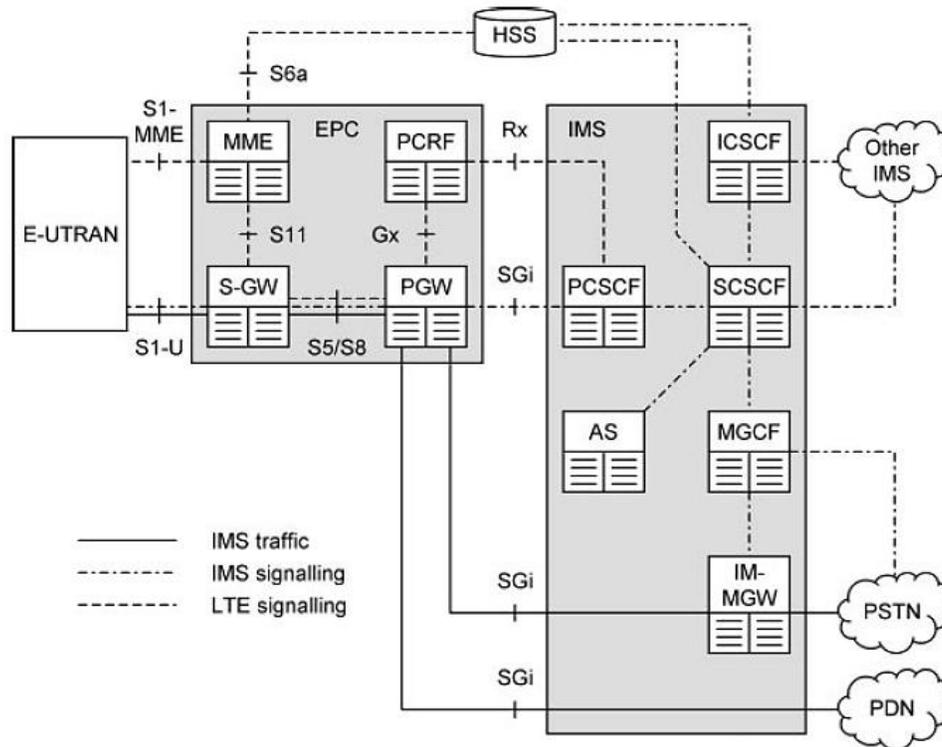


Figura 4.1 Arquitectura básica de IMS [9]

- **Application Server (AS)** [27]: Servidor que ofrece servicios suplementarios en multimedia IP (e.g. buzón de llamadas).
- **Media Gateway Control Function (MGCF)** [27]: Función que permite la señalización en un nivel de interconexión entre la red de telefonía conmutada y redes multimedia de paquetes conmutados.
- **IMS Media Gateway (IM-MGW)** [27]: Nodo que redirecciona la información en plano de usuario de la red PSTN (Public Switched Telephone Network) o de redes en dominio CS.

### 4.3 EPS Bearers

Para el transporte de la información de una parte del sistema a otra y el soporte de servicios de información de usuario final, en LTE se hace uso de *bearers*.

La comunicación de información entre el UE y el eNB es posible gracias al **Radio Bearer** [15]. El intercambio de información entre el eNB y el EPC se posibilita mediante el **S1-Bearer** [12]. Así, la conjunción de un Radio Bearer y un S1-Bearer se denomina **E-RAB** (E-UTRAN Radio Access Bearer) [8]. La figura 2.6 ilustra gráficamente el posicionamiento de los bearers a través de los elementos de red y hasta la conexión con la entidad externa que provee el servicio al usuario.

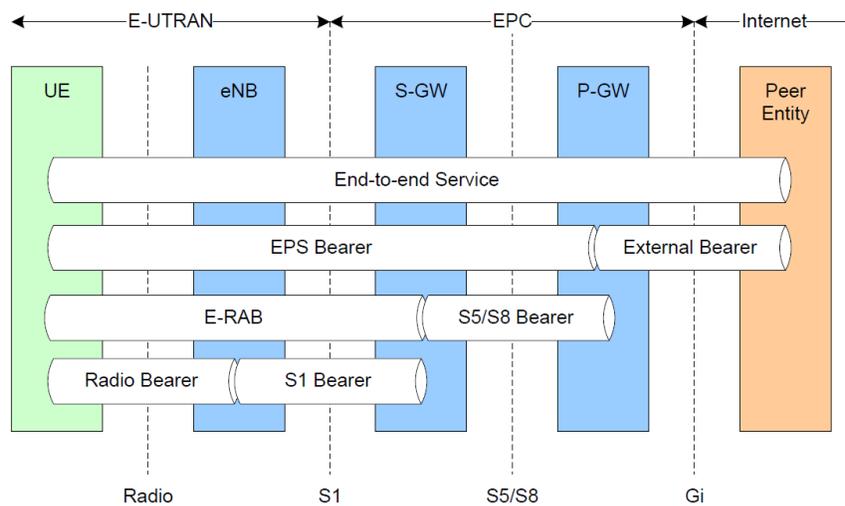


Figura 4.2 Concepto de EPS Bearer [26]

El primer EPS bearer establecido en la conexión PDN [10] (i.e. la asociación entre el UE y una red PDN) se denomina **Default Bearer** [8]. Aquellos EPS bearers que son activados bajo demanda son llamados **Dedicated Bearers** [8].

Una conexión PDN es aquella conexión entre el UE y las redes de paquetes de datos en la red LTE. Dicha conexión PDN es establecida por el UE para acceder a una red externa mediante la red LTE. Para el establecimiento de esta conexión, un **Default Bearer** es creado y mantenido con la conexión PDN hasta que ésta finaliza, pero es posible anexar EPS bearers a medida que el usuario así lo demande mediante la inicialización de aplicaciones que requieran una determinada calidad de servicio.

Cada EPS bearer está asociado con un *Traffic Flow Template* (TFT) [8]. Dicho TFT representa filtros de paquetes IP para el bearer, y son típicamente creados cuando se establece un nuevo EPS Bearer. Por ejemplo, cuando un usuario inicia un nuevo servicio, el filtro correspondiente a ese servicio deberá ser añadido al TFT del EPS bearer que llevará la información de usuario para esa sesión de servicio.

Así, una conexión PDN tiene al menos un EPS bearer, pero puede tener múltiples EPS bearers con el fin de proveer una diferencia en QoS al tráfico IP transportado.

## 4.4 Radio Bearers

Como ya se ha mencionado, para el intercambio de información entre el UE y una red externa a través del sistema LTE/SAE, es necesario comunicar el nodo PDN-GW con el UE; esto es posible a través del EPS Bearer.

El EPS Bearer es mapeado en tres instancias, es decir, recorre tres interfaces, por lo que no se puede implementar directamente. Para solucionar esto, el EPS Bearer es dividido en tres bearers de un nivel más bajo, llamados *Radio Bearer*, *S1 Bearer*, y *S5/S8 Bearer*.

El *radio Bearer* es implementado bajo una configuración de los protocolos de la interfaz de aire (PDCP, MAC, RLC); esta configuración se adapta a los requerimientos de red.

LTE utiliza en el protocolo RRC (Radio Resources Control) [26], tres *radio bearers* especiales, conocidos como *Signaling Radio Bearers* (SRBs) [15], para llevar mensajes de señalización entre el móvil y el eNB. Un SRB porta información de señalización de tipo DCCH y es usado durante el establecimiento de la conexión para establecer el *Radio Access Bearer* (RAB), para que con éste último se pueda entregar señalización durante la conexión (e.g. handover, reconfiguración, o liberación). Cada uno está asociado con una configuración específica de los protocolos de la interfaz de radio, para que el UE y el eNB puedan definir cómo es que los mensajes de señalización deben ser transmitidos y recibidos. En la tabla 4.1 se enlistan los tipos de SRBs.

Signaling Radio Bearer	Configurado para:	Usado por:
SRB 0	Información de sistema	Mensajes de RRC antes de establecer SRB 1
SRB 1	Mensaje de RRC en SRB 0	Mensajes subsecuentes de RRC. Mensajes de protocolo NAS* antes de establecer SRB 2
SRB 2	Mensaje de RRC en SRB 1	Mensajes subsecuentes de NAS*

\*NAS: *Protocolo de capa superior.*

Tabla 4.1 Signaling Radio Bearers

Además de los Signaling Radio Bearers que son utilizados en el plano de control, se utilizan para el plano de usuario los *Data Radio Bearers* (DRB), mismos que se desglosan a continuación.

Data Radio Bearer	Configurado para:	Usado por:
Default Bearer	QoS inicial basado en información de suscripción	Conexión PDN (UE - PGW)
Dedicated Bearer	QoS específica de un servicio	

Tabla 4.2 Data Radio Bearers

## 4.5 Parámetros de QoS

El modelo de QoS (Quality of Service) dicta el comportamiento que se espera del servicio de conectividad proporcionado por una red de transmisión de paquetes. Dicho comportamiento se materializa a través de un conjunto de parámetros de Calidad de Servicio asociados a prestaciones para el usuario. De esta forma, cuando se establecen *Bearers dedicados*, es necesario aplicar una determinada calidad de servicio; a diferencia del tipo de tráfico que no haya sido etiquetado para recibir tratamiento especial de QoS, que va sobre el *Default Bearer*.

La determinación de los paquetes que deberán recibir un trato preferencial de QoS sobre otro tipo de paquetes, estará en función del tipo de suscripción del usuario. Por lo anterior, el operador de red se encuentra en la posibilidad de ofrecer diferentes tipos de suscripción a los clientes para adaptar los servicios a las necesidades del suscriptor.

Los parámetros utilizados para aplicar cierta calidad de servicio a los paquetes se enlistan a continuación.

- **Tipo de EPS Bearer**
  - Guaranteed Bit Rate Bearer (GBR Bearer) [10]: tiene asociados dos valores; la tasa mínima garantizada, que asegura una tasa de transmisión mayor o igual al valor indicado, y la tasa máxima garantizada, que refiere el promedio de los valores pico de las tasas de transmisión más altas que se alcanzarán.
  - Non-Guaranteed Bit Rate Bearer (Non-GBR Bearer) [10]: No garantiza un límite definido en la tasa de transmisión (i.e. la tasa de transmisión puede ser muy baja o muy alta de una manera inestable).

- **QoS Class Indicator (QCI)** [9]:

Número de 8 bits que actúa como un apuntador, y que relaciona una prioridad, un retraso máximo y una tasa de bits en error permitida (véase tabla 4.1). El valor del QCI define qué tipo de tratamiento para enrutar paquetes debe recibir un bearer en particular (i.e. define el tipo de trato en información de plano de usuario).

- **Allocation and Retention Priority (ARP)** [9]:

Usado para indicar la prioridad para la designación o retención de los bearers. Es típicamente usado por la red para decidir cuándo puede ser aceptado el establecimiento o modificación de un bearer, o cuándo es necesario rechazar esta petición debido a limitación de recursos (i.e. define el tipo de trato en información de plano de control).

QCI	Resource Type	Priority	Packet Delay Budget	Packet Error Loss Rate	Example Services
1	GBR	2	100 ms	10 exp -2	Conversational Voice
2		4	150 ms	10 exp -3	Conversational Video (live streaming)
3		3	50 ms	10 exp -3	Real-time gaming
4		5	300 ms	10 exp -6	Non-conversational video (buffering streaming)
5	Non-GBR	1	100 ms	10 exp -6	IMS Signalling
6		6	300 ms	10 exp -6	Video (buffered streaming) TCP-based (e.g. www, e-mail, chat, ftp,p2p file sharing, progressive video, etc.)
7		7	100 ms	10 exp -3	Voice, video (live streaming) interactive gaming
8		8	300 ms	10 exp -6	Video (buffered streaming) TCP-based (e.g. www, e-mail, chat, ftp,p2p file sharing, progressive video, etc.)
9		9	300 ms	10 exp -6	Video (buffered streaming) TCP-based (e.g. www, e-mail, chat, ftp,p2p file sharing, progressive video, etc.)

Tabla 4.3 Calidad de servicio (QoS)-QCI [8]

## 4.6 Codificación para VoIP

Para transmitir señales de voz mediante el protocolo IP, es necesario realizar una digitalización de la voz; es decir, obtener de una señal analógica a través de la cuantificación y del muestreo, una señal digital. Posteriormente, la señal digital es codificada para comprimir el tamaño de la información y acelerar su transmisión. Como paso final, la señal digital y codificada es enviada a través de la red y enrutada hacia su destino. Para la recepción de la señal, es necesario llevar el proceso inverso.

En lo que refiere al uso de codificadores, para la transmisión de VoIP existen distintos estándares, de manera que cada codec posee distintas características. A continuación se enlistan algunos de acuerdo al tipo de compresión que utilizan, a la tasa de transmisión de bit, la duración de trama, entre otros parámetros.

Codec	Bitrate (kb/s)	Frame (ms)	Bits per frame	Compression type	Complexity (MIPS) <sup>c</sup>	MOS
<i>Narrowband codecs</i>						
G.711	64	0.125	8	PCM	≪1	4.1 <sup>d</sup>
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 <sup>e</sup>
BV32	32	5	160	TSNFC	17.5	~4.1

Tabla 4.4 Tipos de codificadores para VoIP [28]

La columna de parámetro MOS (*Measure Opinion Score*) [29] en la tabla arriba mostrada, es un valor en rango de 1 a 5 que indica la calidad de las llamadas de acuerdo al codificador en cuestión, siendo el valor de ‘1’ una mala calidad de llamada y ‘5’ una calidad excelente.

#### **Adaptive Multirate (AMR)** [29]

AMR es un esquema de compresión de audio optimizado para la codificación de llamada de voz. AMR fue adoptado como códec estándar para voz por 3GPP en octubre de 1998 y debe ser soportado en todas las terminales con capacidades de voz con servicio de UMTS y/o LTE. El códec AMR consiste de un códec multi-tasa de transmisión, un esquema de fuente controlada incluyendo un detector de actividad de voz, un sistema de generación de “ruido cómodo” (i.e. sistema para el llenado de silencios artificiales durante la llamada), y un mecanismo de concesión de errores para combatir los efectos de pérdida de paquetes y errores de transmisión.

El códec multi-tasa de transmisión es un único códec de voz con ocho fuentes cuyas tasas de transmisión van de 4.75 kbps a 12.2 kbps y un modo de codificación de bajo ruido. El uso de AMR requiere de una adaptación de enlace optimizada que selecciona el mejor modo de códec que sea utilizable de acuerdo al canal de radio local así como los requerimientos de capacidad. Si las condiciones de radio son malas, la codificación de fuente es reducida y la codificación de canal es incrementada. Además del códec de audio AMR existe una extensión del mismo, llamado AMR-Wideband (AMR-WB).

La tasa de muestreo para AMR-WB es de 16 kHz, que es el doble en comparación con AMR. De esta manera, AMR es comúnmente llamado AMR-NarrowBand (AMR-NB). Similar a AMR-NB, AMR-WB opera con diversos *bit rates*, los cuales van desde los 6.60 kbps hasta 23.85 kbps. Cabe mencionar que ambos, AMR-NB y AMR-WB son usados en los sistemas de radio de HSPA y LTE.

## 4.7 Tráfico de voz (VoIP) en LTE

En el tráfico de voz enviada mediante protocolo IP, es posible identificar dos vertientes que comúnmente suelen interpretarse como equivalentes; VoIP y VoLTE. La cuestión es que a pesar de que ambas técnicas utilizan el protocolo IP, la primera no brinda ningún tipo de prioridad a los paquetes que se envían a través de la red, a diferencia de VoLTE que sí lo hace.

En VoLTE el uso de prioridades a través de campos como QCI, permiten que al tratarse de una llamada de voz, la importancia otorgada a los paquetes de dicha llamada sea mayor que la que se otorga a los paquetes de una búsqueda por explorador de internet, por ejemplo.

De acuerdo a lo anterior, existe la posibilidad de entregar el servicio de voz en la red LTE a través de tres métodos principales, los cuales se describen a continuación.

### **Voz a través de IMS**

Si la terminal móvil tiene capacidades para trabajar con el subsistema multimedia IP (IMS), entonces se registra en su red luego de haber hecho la conexión con la red LTE/SAE. La red IMS responderá la solicitud estableciendo un default EPS bearer para permitir la comunicación de control. Haciendo uso de este default bearer, el móvil manda una solicitud de registro en el protocolo de aplicación SIP (Session Initiation Protocol), dicha solicitud la hace al P-CSCF, quien se encarga de asignarle al UE un S-CSCF que le dará el servicio de telefonía.

En caso de que llegue una llamada, el S-CSCF contacta al móvil mediante un mensaje de señalización SIP sobre el EPS bearer establecido.

Durante el establecimiento de la llamada, los dos UEs intercambian mensajes de señalización con descripciones de parámetros de inicialización del flujo multimedia, y es en este punto en donde se lleva a cabo la negociación para el tipo de códec para voz que será utilizado. Una vez definidos los parámetros de llamada de acuerdo al tipo de suscripción (i.e. parámetros de QoS para la entrega del servicio), el PDN GW establece un dedicated EPS bearer, responsable de llevar la llamada de voz.

**Single Radio Voice Call Continuity (SRVCC) [30]**

Una técnica relacionada es conocida como SRVCC. Si el UE se mueve y sale del área de cobertura de la red LTE, entonces la red puede hacer uso de ésta técnica para transferir el móvil de la comunicación VoIP sobre IMS, a la comunicación tradicional de conmutación de circuitos sobre redes 2G y 3G (e.g. GSM, UMTS). La técnica está basada en un handover de tipo inter-sistema, donde la llamada de telefonía fue iniciada en la red LTE y se encuentra en curso, de forma que el servicio no debe interrumpirse. Cuando se realiza el handover, la ejecución de la llamada se hace en el dominio CS a través de la red IMS, y es necesaria la interfaz Sv (interconectando al MME y al MSC) para la transferencia de datos de suscripción del usuario sin una interrupción. Esta opción es utilizada cuando durante la llamada de voz se pierde la cobertura de red LTE, de forma que esta misma es trasladada a un ambiente de 2G/3G cuya cobertura de red sí está presente.

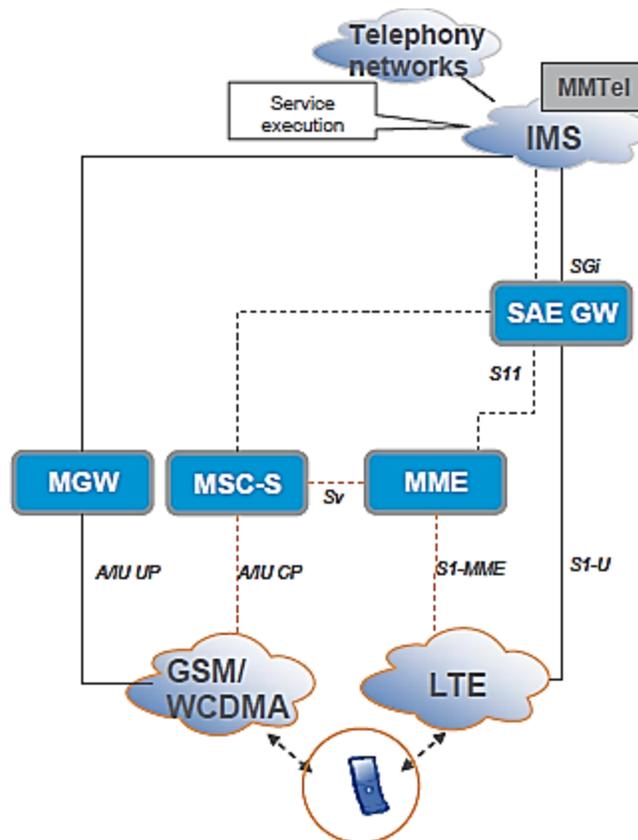


Figura 4.3 SRVCC [10]

**CSFB** [10]

Muchos operadores de red están actualmente migrando a redes LTE, incluso antes de hacerlo a subsistemas que soporten la comunicación multimedia por IP. Debido a esto, existirán usuarios que necesiten realizar llamadas de voz desde dispositivos LTE aún sin el uso de IMS. Para lidiar con esta posibilidad, 3GPP ha estandarizado una técnica conocida como *Circuit Switched Fallback* como un acercamiento a desplegar una solución interina.

Usando CS Fallback, el usuario puede realizar llamadas de voz a través del retroceso en uso de tecnología celular; regresando a las comunicaciones tradicionales en el dominio CS sobre UMTS o GSM. La arquitectura mostrada en la Figura 5.4 está orientada a la inter-operación con el dominio de paquetes conmutados 2G/3G, soportando por igual el dominio de conmutación de circuitos.

En esta arquitectura el MME puede comunicarse con el nodo Mobile Switching Center (MSC) que soporta el retroceso o ‘fallback’ a CS a través de una nueva interfaz que es denominada *SGs*. Los mensajes de señalización se producen a través del protocolo de aplicación *SGs application protocol* (SGsAP). Haciendo uso de estos mensajes, un UE puede registrarse en el nodo MSC y establecer una llamada de voz en el dominio CS, e inclusive es a través de esta interfaz que se hace el envío de mensajes SMS (con la técnica *SMS over SGs*) teniendo como origen de envío el sistema EPS.

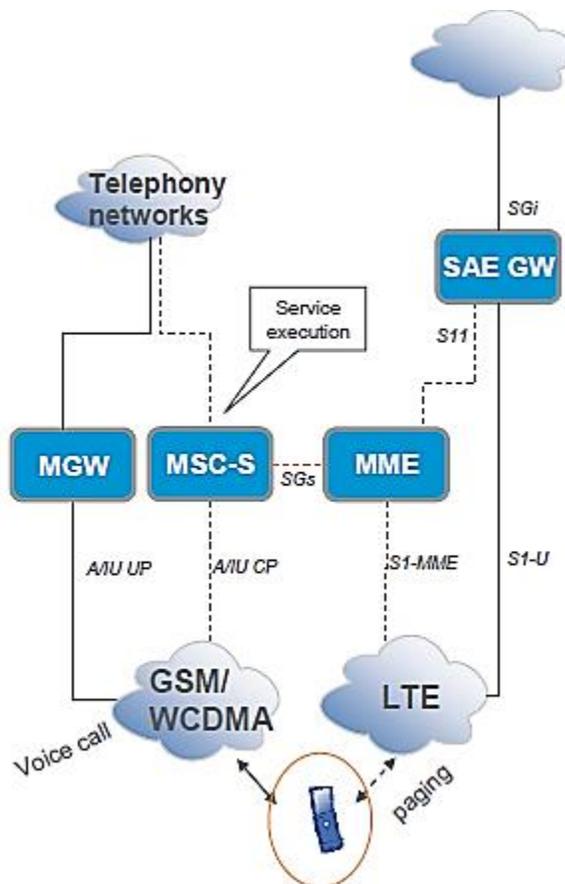


Figura 4.4 CS Fallback [10]

# CAPÍTULO 5

## MODELO TEÓRICO DE IMPLEMENTACIÓN

---

### 5.1 Introducción

MATLAB es un lenguaje interactivo de alto nivel utilizado para trabajar con múltiples disciplinas, incluyendo procesamiento de señales e imágenes, comunicaciones, sistemas de control, y cálculos computacionales.

La iniciativa de utilizar dicha herramienta ha sido trabajar en un ambiente de desarrollo que permita la adaptación de una interfaz gráfica y la elección de parámetros para una simulación de despliegue de la tecnología en términos de throughput vs UE, es decir, en términos de la capacidad de la red. Ante esta comparación es posible observar a cuántos UEs se les puede brindar servicio y la velocidad de throughput que se les brindará frente a los parámetros seleccionados en capa física y tipo de codificación para llamadas de voz.

## 5.2 Configuración de los servicios y elementos

Para identificar la capacidad en término de llamadas posibles que puede procesar la red, es necesario conocer la tasa de transmisión de cada uno de los codecs con los que se digitalizará la voz. Por ser éste trabajo un modelo de implementación para tecnología utilizada actualmente, se han considerado codificadores de banda angosta y banda ancha para VoLTE y codecs usados para VoIP.

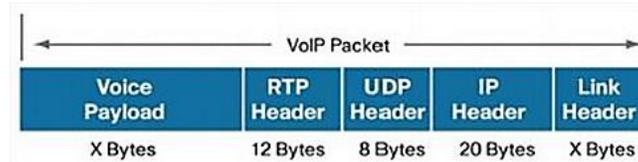


Figura 5.1 Paquete de VoIP [22]

El tamaño en Bytes del apartado 'Voice Payload' dependerá del códec a utilizar, pues es este apartado el que representa la voz digitalizada que se transmitirá hasta un receptor, el resto de apartados tienen propósito de señalización; el encabezado Real-Time Protocol (RTP) es usado para la transmisión de información en tiempo real, el encabezado UDP actúa como responsable de señalización en la capa de transporte, el encabezado IP actúa en capa de red, y el encabezado de enlace de datos actúa en capa dos.

La tasa de transmisión de cada códec puede ser obtenida de la siguiente manera:

$$Tasa\ de\ transmisión_{códec} [bps] = \frac{(Voice\ Payload\ [Bytes]) * \left(\frac{bits}{muestra}\right)}{intervalo\ de\ muestreo [s]} \quad (1)$$

Para realizar el cálculo del tamaño total de cada paquete de VoIP, se consideran los encabezados RTP, UDP, IP, y encabezados de enlace de datos (i.e. encabezados PDCP, RLC, y MAC, cuyo valor es de 2,5, y 5 Bytes respectivamente). Lo que genera un total de 52 Bytes por información de encabezados en el paquete de VoIP para el estudio en cuestión.

Es importante mencionar que para los fines de este trabajo en relación al cálculo de llamadas de voz en el ambiente de Conmutación de Paquetes, en las tablas 5.1 y 5.2 se consideran las columnas 'Bit Rate LTE PHY [kbps]' cuya versión no considera el mecanismo de ROHC, simulando el peor de los casos para el consumo de Bit Rate a nivel de capa física, que es el mismo nivel al que se transmite la información de todas las capas superiores.

Los codecs a utilizar son los siguientes:

CODEC	Voice Payload [Bytes]	Frame Interval [ms]	Codec Bit Rate [kbps]	Pks/s	- ROHC	+ ROHC	+ROHC+VS
					Bit Rate LTE PHY [kbps]	Bit Rate LTE PHY [kbps]	Bit Rate LTE PHY [kbps]
G.711	80	10	64	100	105.6	76.0	34.2
G.729	10	10	8	100	49.6	20.0	9.0
G.723.1	24	30	6.4	20	12.3	6.3	2.8
G.723.1	20	30	5.3	33	19.2	9.3	4.2
G.726	25	5	40	200	123.2	64.0	28.8
G.726	15	5	24	200	107.2	48.0	21.6
G.728	10	5	16	200	99.2	40.0	18.0
AMR	30.5	20	12.2	50	33.0	18.2	8.2
G.722.2	16.06	10	12.85	100	54.5	24.9	11.2

Tabla 5.1 Codecs para VoIP

A diferencia de los codecs de la Tabla 5.1, que son utilizados para Voz sobre IP, los codecs que aparecen en la Tabla 5.2, que también se han considerado para el presente modelo, están clasificados por tipo de banda angosta y tipo de banda ancha; ambos se encuentran dentro del tipo de codec AMR. La diferencia para considerar a un codec como codec de banda ancha radica en su capacidad de muestrear en intervalos más amplios grupos de payload más grandes. Se puede identificar, por ejemplo, que un codec G.723.1 tiene un intervalo de muestreo de 30 ms, pero el payload que puede codificar es de 24 Bytes (192 bits), mientras un codec de banda ancha AMR 23.85 puede codificar 477 bits en una trama de 20 ms.

						- ROHC [52 Bytes de Header]	+ ROHC [15 Bytes de Header]	+ROHC+VS
						Bit Rate LTE PHY [kbps]	Bit Rate LTE PHY [kbps]	Bit Rate LTE PHY [kbps]
	CODEC	Voice Payload [Bytes]	Frame Interval [ms]	Codec Bit Rate [kbps]	Pks/s			
<b>Narrow Band</b>	AMR_4.75	11.875	20	4.75	50	25.6	10.8	4.8
	AMR_5.15	12.875	20	5.15	50	26.0	11.2	5.0
	AMR_5.90	14.75	20	5.9	50	26.7	11.9	5.4
	AMR_6.70	16.75	20	6.7	50	27.5	12.7	5.7
	AMR_7.40	18.5	20	7.4	50	28.2	13.4	6.0
	AMR_7.95	19.875	20	7.95	50	28.8	14.0	6.3
	AMR_10.20	25.5	20	10.2	50	31.0	16.2	7.3
	AMR_12.20	30.5	20	12.2	50	33.0	18.2	8.2
<b>Wide Band</b>	AMR_6.60	16.5	20	6.6	50	27.4	12.6	5.7
	AMR_8.85	22.125	20	8.85	50	29.7	14.9	6.7
	AMR_12.65	31.625	20	12.65	50	33.5	18.7	8.4
	AMR_14.25	35.625	20	14.25	50	35.1	20.3	9.1
	AMR_15.85	39.625	20	15.85	50	36.7	21.9	9.8
	AMR_19.85	49.625	20	19.85	50	40.7	25.9	11.6
	AMR_23.05	57.625	20	23.05	50	43.9	29.1	13.1
	AMR_23.85	59.625	20	23.85	50	44.7	29.9	13.4

Tabla 5.2 Codecs para VoLTE

La Figura 5.1 ilustra el desempeño de los codecs de voz de 3GPP basado en conductas subjetivas de sesenta y cuatro personas organizadas por Nokia para una comparación tangible de codecs [29]. Se utilizó una metodología cuyo MOS considera una escala de 9 puntos, representando el número 9 una calificación de ‘Excelente’ y el número 1 ‘Muy malo’.

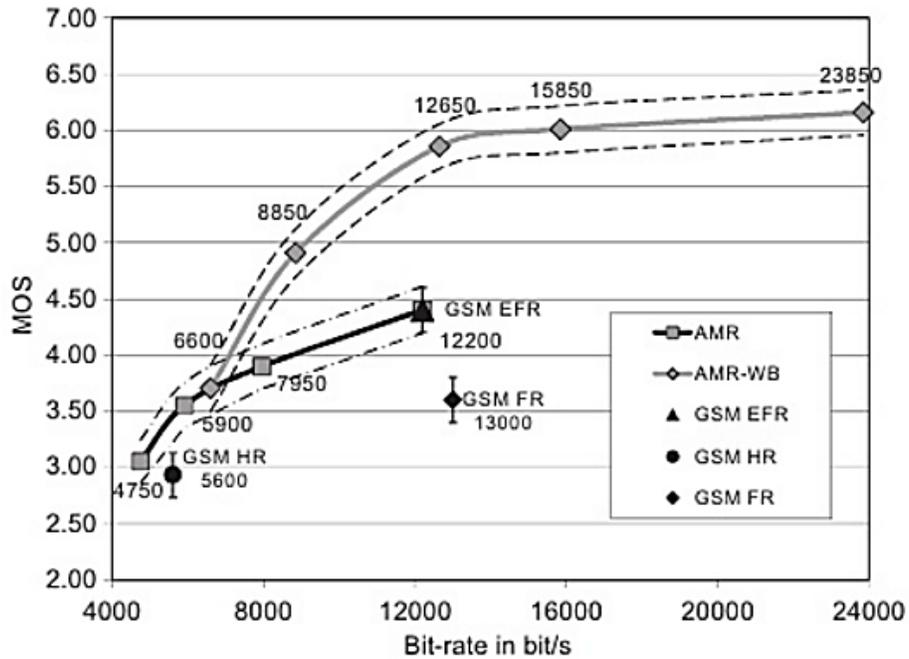


Figura 5.2 AMR vs GSM Full Rate, Half rate, Enhanced Full Rate [29]

### 5.3 Elaboración de interfaz

Para la elaboración de la interfaz gráfica se dispuso un enfoque en tres áreas distintas e interrelacionadas; un modelado a nivel de capa física, uno a nivel de codificación, y uno más a nivel del modelo de propagación. A continuación se describe cada apartado.

En el modelado de capa física es posible modificar parámetros para seleccionar el esquema de modulación, el índice de configuración de la subtrama especial, el índice de configuración TDD, el ancho de banda del canal a utilizar, y es posible también observar el número de Resource Elements disponibles para cada enlace (Uplink y Downlink) de acuerdo a los parámetros seleccionados. Se despliega también el tipo de configuración elegida para la trama y para la subtrama especial. Es mostrada como referencia una tabla del esquema de modulación y codificación, MCS por sus siglas en inglés, con la que es posible asociar un número de 'code rate' con el índice de modulación que se utiliza. Dentro de la capa física se visualiza, luego de elegir los parámetros antes mencionados, el throughput de ambos enlaces de comunicación. El despliegue de throughput se hace sin la consideración de un code rate en este apartado.

En la selección del modelo de propagación es posible elegir un esquema completo cuyos parámetros tienen valores fijos. Las características aquí seleccionadas son físicas y relacionadas al enlace de comunicación entre el eNB y el UE; ganancia de las antenas, Figura de ruido, frecuencia central del canal a utilizar, altura a la que se encuentran las antenas, distancia entre antenas, Potencia Isotrópica Radiada Equivalente. Una vez designado el valor para cada factor de medición de acuerdo al modelo seleccionado, es posible desplegar herramientas gráficas para cada modelo de propagación visualizando en ventanas simultáneas la pérdida de potencia en función de la distancia, el valor de SNR en función de la distancia, y en una gráfica radial la tasa de transmisión del código utilizado de acuerdo al esquema de modulación elegido; esta última gráfica hace referencia a la huella de un eNB.

A nivel de codificación, es posible modificar ciertos parámetros en uno de los tres apartados dentro de la interfaz gráfica; se posibilita la elección de codecs de audio de acuerdo al tipo de calidad que se requiera implementar en la llamada de voz. Los codecs desplegados son los mostrados en la sección anterior: codecs para VoIP, y codecs para VoLTE. En esta sección se ubican valores de la tasa de transmisión de datos a nivel de capa de red y a nivel de capa física, lo que permite visualizar el throughput máximo alcanzable de acuerdo al tipo de codec elegido.

## 5.4 Variables de simulador

Las variables utilizadas para la configuración de un ambiente personalizado en el simulador se encuentran distribuidas a lo largo de las tres áreas señaladas en el subtema anterior.

### Capa Física

Para el apartado de capa física se utiliza el ancho de banda de canal, cuya función es permitir al usuario la designación de espacio para los *Resource Elements* que le podrán ser destinados, y para lo cual se hace referencia también a la variable *Physical Resource Blocks*, valor con el que se hace la correspondencia de capacidad para el ancho de banda seleccionado.

Existen índices de configuración TDD y SS, cuyos valores se detallan en el capítulo número tres. Indican la disposición que tienen las subtramas en el arreglo; la duración de subtramas destinadas a UL, DL, y señalan la duración en símbolos OFDM que tiene cada sección de la subtrama especial.

Es posible modificar el índice de modulación para realizar la simulación de un ambiente con calidad de radio bueno, malo o intermedio. De acuerdo al índice de modulación seleccionado se despliegan tasas de transmisión de codec disponibles y en referencia al *Modulation and Coding Scheme* (MCS).

### Modelo de propagación

Para este apartado se hace elección del modelo de propagación del menú desplegable. Basado en la selección, se muestran los valores de los parámetros con los que trabaja el modelo. Se definen valores iniciales, como lo son la distancia inicial (distancia más cercana entre el UE y el eNB), la altura de las antenas y ganancia de las mismas, así como la atenuación del medio en el que se realiza la transmisión de información.

Se proyectan gráficos que están en función de la distancia para representar cuál es el acercamiento que debe tener un UE al eNB que le brinda servicio para lograr un desempeño óptimo al adoptar un esquema de modulación y de codificación. Se observan tres tipos de gráficos:

- Distancia radial: involucra el *Code Rate* que es posible utilizar para el UE de acuerdo a la distancia radial que exista hasta el eNB. Toma como punto de referencia (punto de origen) la ubicación del eNB. Véase Figura 5.2
- SNR contra distancia: presenta la degradación del valor de SNR a medida que la distancia entre el UE y el eNB aumenta. Véase Figura 5.3
- $P_{rx}$  contra distancia: se visualiza la degradación de la potencia de recepción en el UE a medida que la distancia entre el equipo de usuario y el eNB aumenta. Véase Figura 5.4

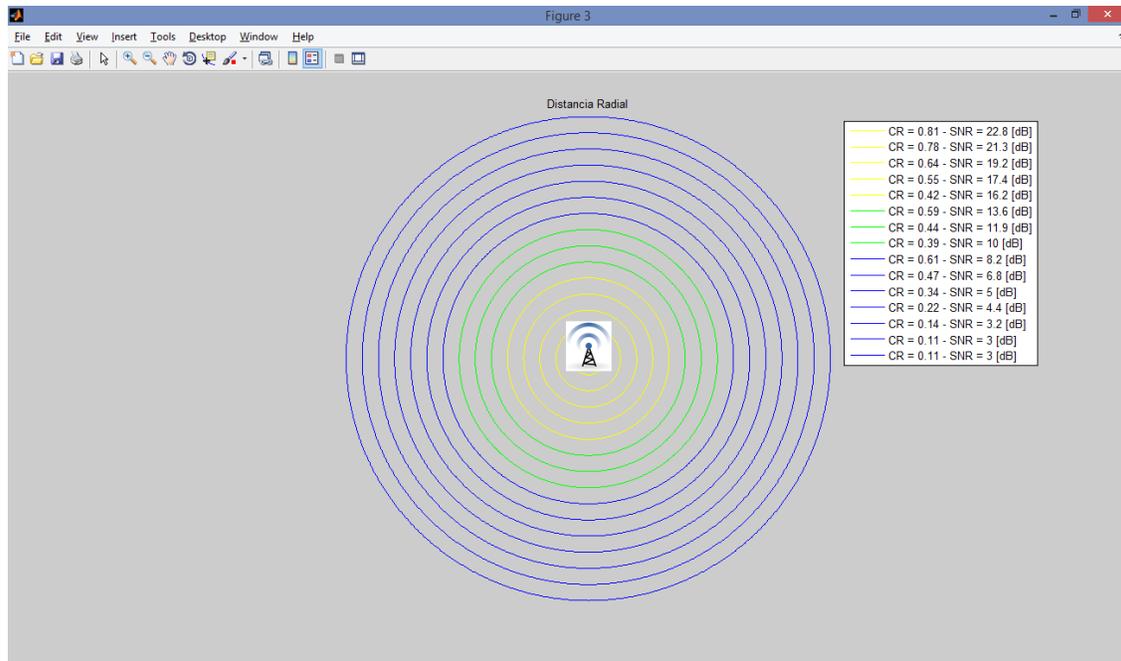


Figura 5.3 Ejemplo de gráfica 'Distancia radial'

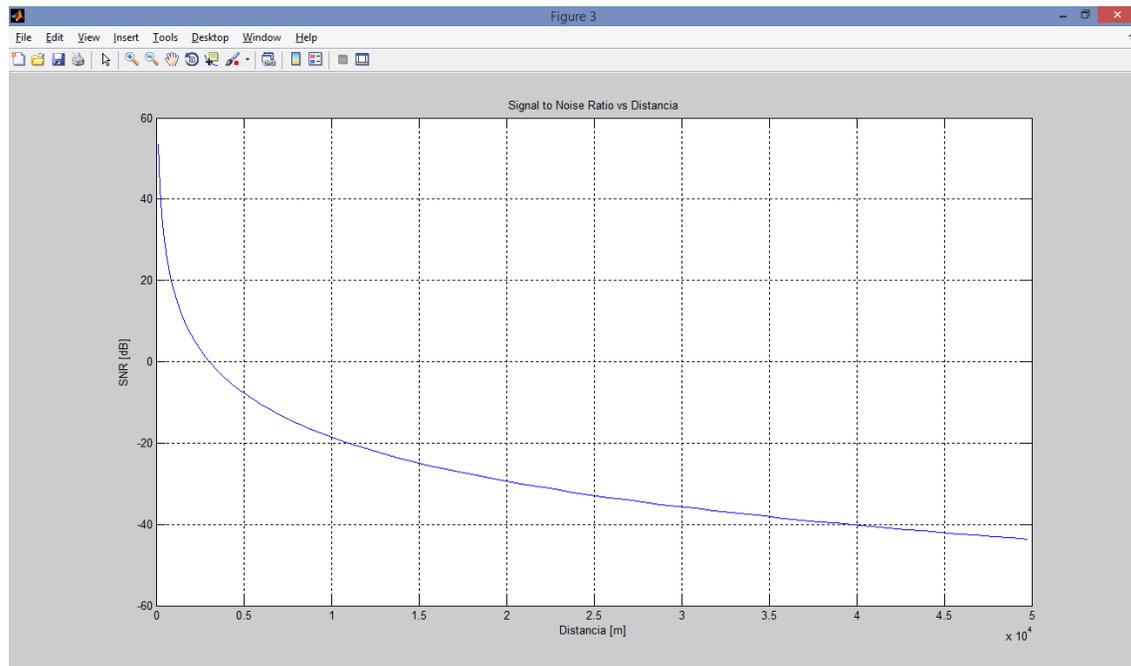


Figura 5.4 Ejemplo de gráfica 'SNR contra distancia'

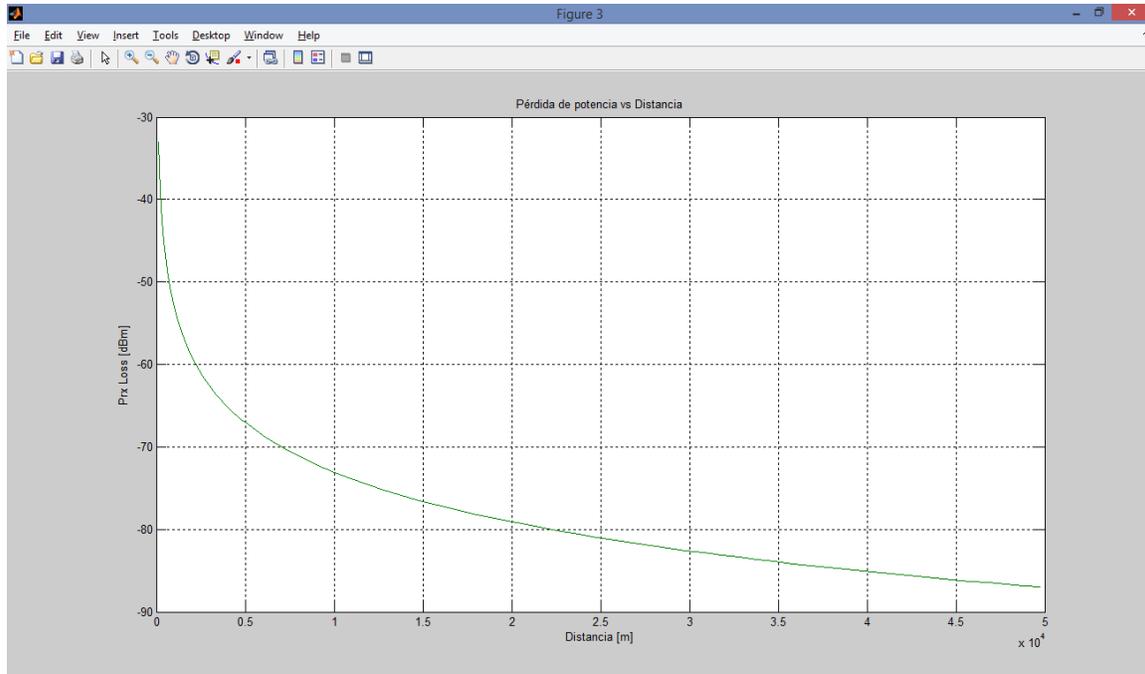


Figura 5.5 Ejemplo de gráfica 'Prx contra distancia'

### Codificación

En esta sección se le facilita la elección de codec al usuario. Los codecs se agrupan en tres grupos: VoIP, Narrow Band, y Wide Band.

Se entrega el cálculo de la tasa de información transmitida a nivel IP (sin considerar encabezados de capa 2) y el cálculo de tasa de información transmitida a nivel de capa física (considerando los encabezados de todo el paquete más el payload que soporta el codec elegido).

En este apartado se despliega el Code Rate que ha sido seleccionado de acuerdo al índice de modulación utilizado previamente en la sección de 'Capa Física'.

Se muestra también el throughput máximo para los enlaces de DL y de UL para considerar con este valor, la capacidad de soportar un determinado número de llamadas telefónicas. Este valor numérico representa el cálculo realizado en 'Capa física' de los *Resource Elements*, pero con la consideración del Code Rate seleccionado (i.e. no todos los bits transmitidos son bits de payload; se incluyen bits de paridad).

# CAPÍTULO 6

## RESULTADOS Y CASOS EJEMPLO

---

### 6.1 Introducción

En este capítulo se plasma el conjunto de pruebas ejecutadas sobre la interfaz gráfica de usuario presentada en este trabajo de tesis, habiendo analizado previamente la capacidad de la herramienta para calcular y configurar un ambiente personalizado para el despliegue del funcionamiento de LTE.

Para conocer el número de llamadas permitidas por el sistema en una célula, es necesario identificar los recursos que son destinados para la señalización y el control de la comunicación entre los nodos involucrados, por lo tanto, en esta sección se explica el desempeño de la herramienta haciendo un desglose de los cálculos involucrados, se hace un análisis del tráfico de voz cursante a través de una red LTE con las características definidas sobre la GUI, se realiza el análisis de tráfico combinado a través de casos ejemplo que hacen uso de la superposición de gráficas para una comparación de diseños de red, y posterior a los casos ejemplo, se analizan de manera general las configuraciones realizadas y se presentan una a una la cantidad de usuarios admitidos para cada escenario. En el último subtema de este capítulo se realiza un comparativo de los casos con el objetivo de entregar una conclusión sobre la configuración utilizada y principalmente sobre la herramienta en cuestión.

## 6.2 Análisis de desempeño.

Para realizar el cálculo de throughput del que se dispone en una célula y posteriormente calcular el número de llamadas permitidas en ella, es necesario conocer los *Resource Elements* restantes después de utilizar los correspondientes para señalización y control. A continuación se mencionan las características de los canales de control que utilizan elementos de recurso (*Resource Elements*) en las subtramas y la disposición que tienen en la cuadrícula ‘tiempo-frecuencia’, también conocida como *Resource Grid*. La información referente a estas características puede ser localizada en [31].

- PDCCH: utiliza los 2 o 3 primeros símbolos de las subtramas dedicadas al enlace descendente y de las subtramas especiales. Ocupan todas las subportadoras del sistema e incluye señales de referencia (RS), incluye canal PCFICH y canal PHICH. Estos últimos dos canales son agrupados en 4 subportadoras y sólo ocupan 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: el canal secundario de sincronización, se ubica en dos de las subtramas de DL. El canal 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 del ancho de banda usado. Ocupa los 14 símbolos de las subtramas de UL.
- 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 de UL.
- SRS: estas señales van en el último símbolo de las subtramas de enlace de UL y se extienden en todo lo largo de la zona PUSCH.

**Throughput**

Las aclaraciones antes mencionadas se consideran para los recursos destinados a control en el apartado 'RE<sub>control</sub>' de la ecuación 2. De la ecuación es posible obtener el throughput del enlace (aplica para DL y para UL por igual) en bits por segundo:

$$\textit{Throughput [bps]} = (RE_{\textit{Totales}} - RE_{\textit{Control}}) * 100 * m * CR \quad (2)$$

Donde:

**RE:** Resource Elements  
**100:** Número de tramas en un segundo  
**m:** Índice de modulación  
**CR:** Code Rate

Para identificar la disposición de REs en control, se hizo la simulación en [44] para cada combinación de los índices de configuración TDD con los índices de subtrama especial (parámetros encontrados en la GUI), calculando de esta manera la variación en el acomodo dentro de los PRBs.

En la figura 6.1 se observa un ejemplo de la simulación con índice de configuración TDD '0' e índice de configuración de subtrama especial '0', en un ancho de banda de canal de 1.4 MHz (i.e. 6 PRB). Se permite reconocer la distribución de los elementos de control en la rejilla con una granularidad de subportadora-símbolo (Resource Element), lo cual resulta conveniente para identificar los dos slots de cada subtrama y las diez subtramas que conforman una trama completa.

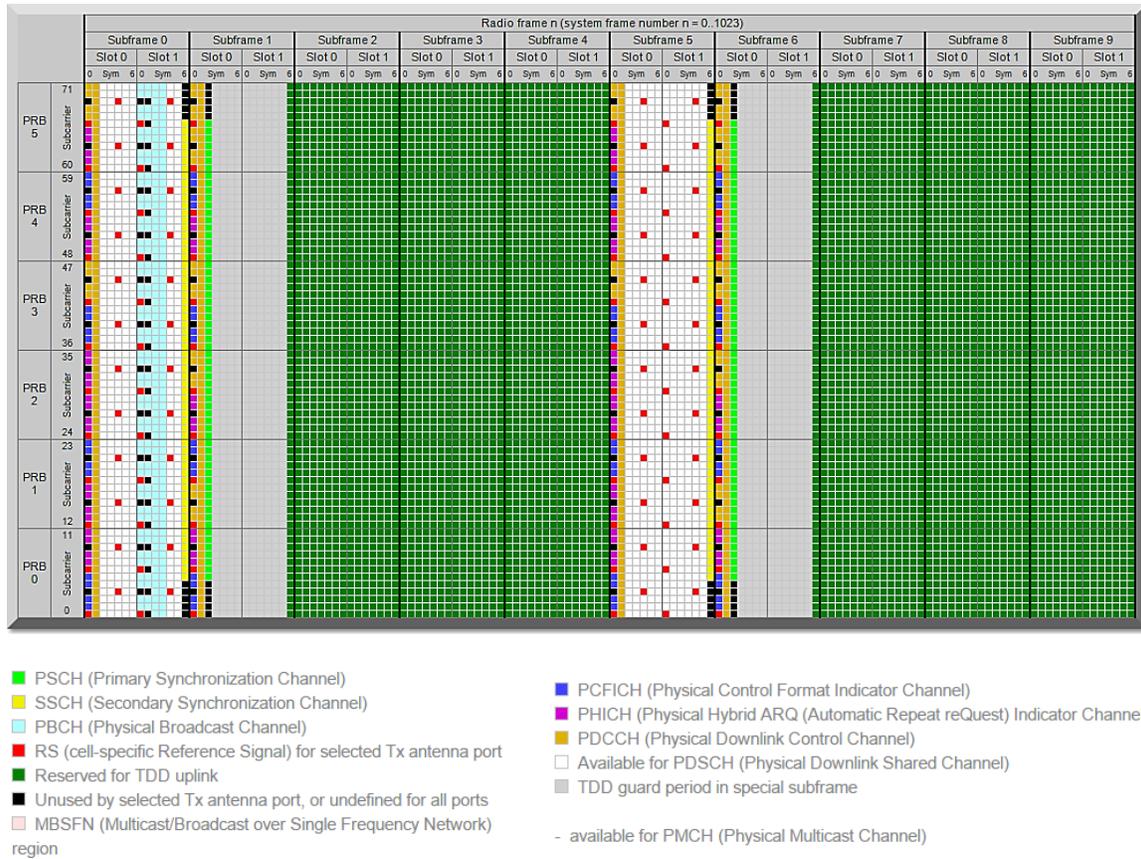


Figura 6.1 Rejilla de Elementos de Recurso en simulación

**Número de llamadas**

Como se observó, para el cálculo de throughput se consideran los REs con los que cuenta el canal de transmisión a causa de los parámetros en el ambiente de radio y en las características de uso que el eNB selecciona para poder aprovechar el medio de la mejor forma posible. Es en este punto que se debe definir que para el dimensionamiento real en capacidad de llamadas soportadas por un eNB, se considerará siempre el número de llamadas que el enlace de uplink (UL) pueda soportar, pues comparado con el enlace de downlink (DL) es quien presenta el menor número de recursos.

Con fines didácticos se muestra el valor que sería posible obtener en el enlace de DL, ya que el tipo de configuración elegida no modificará el hecho de que el número de llamadas en enlace de subida sea menor que el número de llamadas en enlace de bajada.

En la Figura 6.2 se muestra un diagrama de flujo para dimensionar el número de llamadas de VoLTE, donde se observa que el número de llamadas en UL será la limitante para DL.

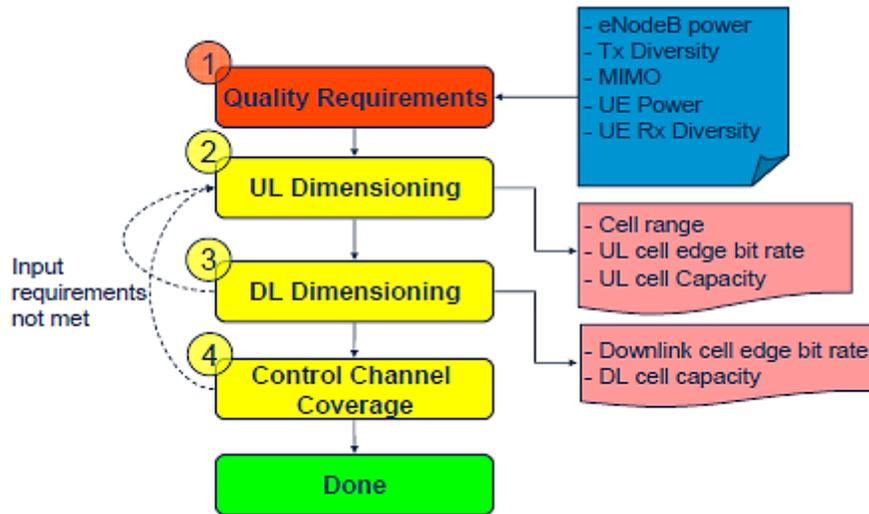


Figura 6.2 Diagrama de flujo para dimensionamiento de ambiente de radio en eNB

Conociendo este factor y entendiendo que el uso de datos sobre el canal obedece a los límites en UL, el número de llamadas simultáneas que es posible realizar en una celda de LTE, se calculará a través de la siguiente fórmula:

$$\text{Número de llamadas} = \frac{\text{Throughput [bps]}}{\text{Tasa de Tx PHY}_{\text{c\acute{o}dec}[\text{bps}]}} \tag{3}$$

Donde:

$$\text{Tasa de Tx PHY}_{\text{c\acute{o}dec}[\text{bps}]} = \frac{(\text{Voice Payload [Bytes]} + 52 [\text{Bytes}]) * \left(8 \left[\frac{\text{bits}}{\text{muestra}}\right]\right)}{\text{intervalo de muestreo [s]}} \tag{4}$$

En la ecuación (4) se consideran los encabezados de todo el paquete de VoIP (52 Bytes) adicionales a la carga de Payload. Es por esto que se considera una tasa de transmisión del codec a nivel de capa física. Esta tasa de transmisión de codec a nivel de capa física representa el parámetro ‘Bit Rate LTE PHY’ presente en la tabla 5.2 donde existe la comparación entre el Bit Rate LTE PHY sin Robust Header Compression (ROHC), con ROHC, y por último, con una versión más reciente de ROHC con el cual se logra una mayor compresión del encabezado de paquete. En cuanto al intervalo de muestreo, se considera el valor en segundos del parámetro ‘Frame Interval’ de la misma tabla, valor que representa la capacidad de muestreo del codec indicando el segmento que toma para codificar o decodificar los paquetes.

### 6.3 Análisis de tráfico de voz.

A continuación se despliegan casos de tráfico de voz con configuraciones específicas en la interfaz presentada, y cuyos valores se especifican en cada escenario.

Las condiciones bajo las cuales se desarrollaron estos casos ejemplo son:

- Prefijo cíclico normal
- Control Format Indicator (CFI): 1 (i.e. 2 símbolos para PDCCH)
- 24 REs para DM-RS por cada PRB (i.e. por cada 12 subportadoras)
- 12 REs para SRS por cada PRB (i.e. por cada 12 subportadoras)
- Se consideran los REs de las subtramas especiales (DwPTS y UpPTS) como aportación de recursos para información en Plano de Usuario en enlaces de UL y DL [7]
- Número de puertos para antenas de Tx: 1

**Caso de ejemplo #1**

- BW: 3 MHz
- Índice de configuración TDD: 6
- Índice de configuración de subtrama especial: 4
- Codec: G711
- MCS: 9 (m=2 y CR=0.61)

En este caso de ejemplo es utilizado un BW de 3 MHz, cuyo valor en PRBs es de 15. El índice de configuración TDD '6' refiere una disposición de tres subtramas para enlace de DL, cinco subtramas para el enlace de UL, y dos subtramas especiales. El índice de configuración de subtrama especial '4' tiene una disposición de doce símbolos DwPTS, un símbolo para GP, y un símbolo UpPTS.

En el apartado de 'Capa Física' de la Figura 6.3 se visualiza que la asignación de Elementos de recurso en canal PDSCH (i.e. transmisión de Payload en DL) es menor que la disponibilidad de REs en PUSCH (i.e. transmisión de Payload en UL), lo que tiene incidencia en el Throughput y a su vez en el número de llamadas.

Se observa que al utilizar un índice de modulación de 2 bits/símbolo, el máximo valor elegible de C.R. es de 0.61, obteniendo por Throughput 1.00284 Mbps en DL y 0.8418 Mbps en UL.

Aplicando las fórmulas (2), (3) y (4) bajo la consideración del uso de codec G711, se tiene que el número de llamadas en enlace ascendente es de 7 y en enlace descendente es de 9.

## Cálculo del throughput para LTE con estructura de trama tipo TDD

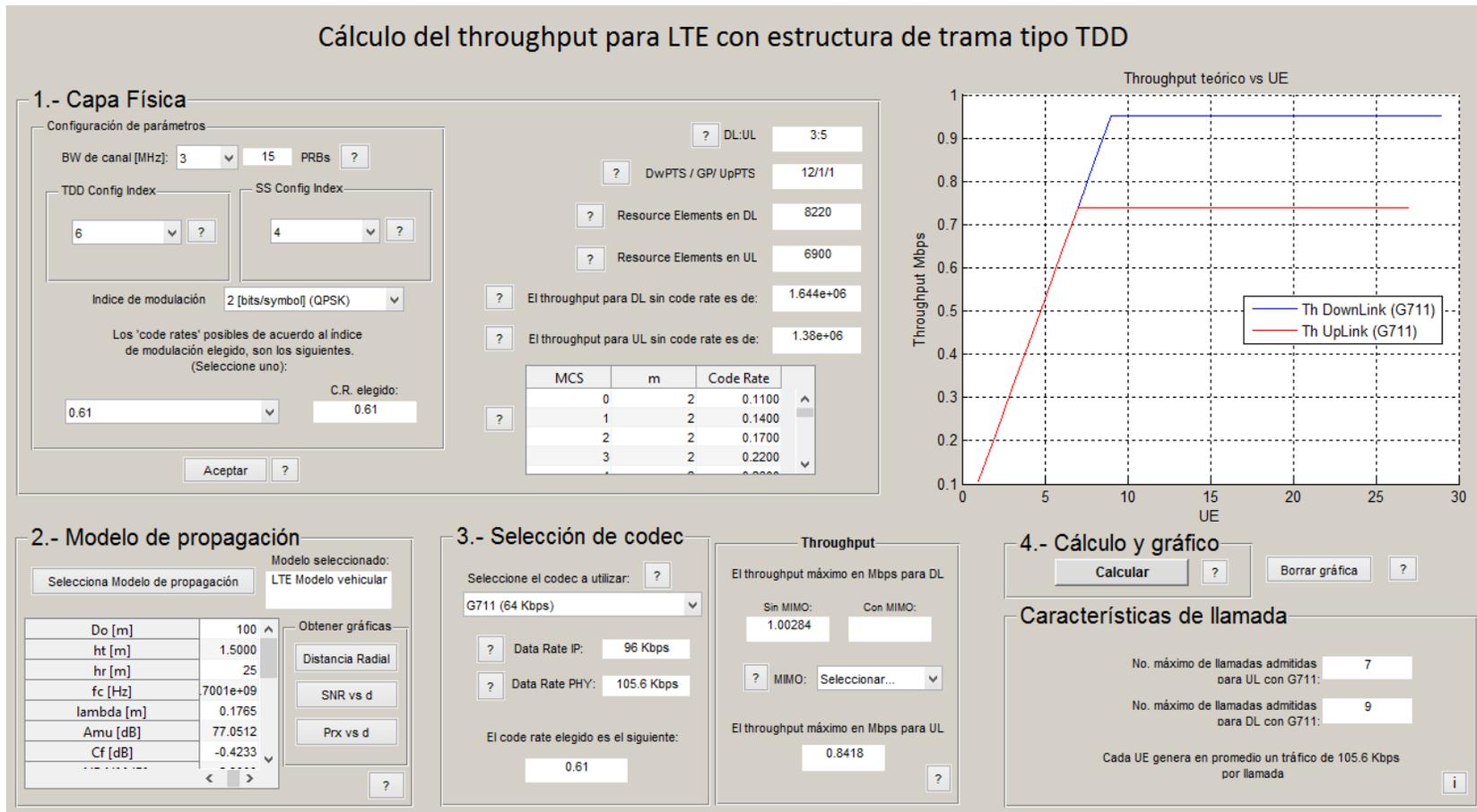


Figura 6.3 Caso ejemplo #1 en Interfaz gráfica de modelado de voz

**Caso de ejemplo #2**

- BW: 3 MHz
- Índice de configuración TDD: 6
- Índice de configuración de subtrama especial: 4
- Codec: G711
- MCS: 28 (m=6 y CR=0.81)

Para este escenario es utilizado el mismo ancho de banda de 3 MHz, cuyo valor corresponde a 15 PRBs. El índice de configuración TDD '6' indica la asignación de tres subtramas para enlace de DL, cinco subtramas para el enlace de UL, y dos subtramas especiales. El índice de configuración de subtrama especial '4' tiene una disposición de doce símbolos DwPTS, un símbolo para GP, y un símbolo UpPTS.

En la sección de 'Capa Física' de la Figura 6.2 se observa que la asignación de Elementos de recurso en canal PDSCH (i.e. transmisión de Payload en DL) es menor que la disponibilidad de REs en PUSCH (i.e. transmisión de Payload en UL), lo que tiene incidencia en el Throughput y a su vez en la capacidad del número de llamadas soportadas en una célula por el eNB.

Se observa que al utilizar un índice de modulación de 6 bits/símbolo, el máximo valor elegible de C.R. es de 0.81, valor que se ve representado como el más alto lo que habilita obtener por Throughput de DL 3.99492 Mbps y 3.3534 Mbps en UL.

Aplicando la fórmula (3) y (4) bajo la consideración del mismo codec que en el caso ejemplo anterior: G711, se tiene que el número de llamadas en enlace ascendente es de 31 y en enlace descendente es de 37.

En la gráfica se desglosa una relación lineal entre Throughput y UE que se conectan al eNB de una célula de manera simultánea. Esta relación lineal se modifica hasta que se llega al límite de número de llamadas indicado por la GUI de acuerdo a los parámetros ingresados. Es posible seguir admitiendo usuarios para la realización de llamadas, sólo que estas llamadas ya no se realizarán de manera simultánea, es decir, se tendrán múltiples UEs conectados al eNB de la célula en cuestión pero la llamada se realizará en un instante de tiempo diferente.

La asignación de recursos a un UE para una llamada será provista únicamente si existen recursos para asignar en ambos enlaces (UL y DL). En este sentido, el mecanismo de calendarización en LTE depende de la tasa de transmisión en enlace de UL, pues en cualquier ejemplo desglosado en el presente trabajo el throughput para UL es el menor valor de ambos enlaces.

## Cálculo del throughput para LTE con estructura de trama tipo TDD

### 1.- Capa Física

Configuración de parámetros

BW de canal [MHz]: 3 15 PRBs ?

TDD Config Index: 6 ?

SS Config Index: 4 ?

Indice de modulación: 6 [bits/symbol] (64 QAM)

Los 'code rates' posibles de acuerdo al índice de modulación elegido, son los siguientes. (Seleccione uno):

C.R. elegido: 0.81

DL:UL 3:5

DwPTS / GP/ UpPTS 12/1/1

Resource Elements en DL 8220

Resource Elements en UL 6900

El throughput para DL sin code rate es de: 4.932e+06

El throughput para UL sin code rate es de: 4.14e+06

MCS	m	Code Rate
0	2	0.1100
1	2	0.1400
2	2	0.1700
3	2	0.2200

### Throughput teórico vs UE

### 2.- Modelo de propagación

Modelo seleccionado: LTE Modelo vehicular

Selecciona Modelo de propagación

Do [m]	100
ht [m]	1.5000
hr [m]	25
fc [Hz]	7001e+09
lambda [m]	0.1765
Amu [dB]	77.0512
Cf [dB]	-0.4233

Obtener gráficas

Distancia Radial

SNR vs d

Prx vs d

### 3.- Selección de codec

Seleccione el codec a utilizar: G711 (64 Kbps)

Data Rate IP: 96 Kbps

Data Rate PHY: 105.6 Kbps

El code rate elegido es el siguiente: 0.81

### Throughput

El throughput máximo en Mbps para DL: Sin MIMO: 3.99492

El throughput máximo en Mbps para UL: 3.3534

### 4.- Cálculo y gráfico

Características de llamada

No. máximo de llamadas admitidas para UL con G711: 31

No. máximo de llamadas admitidas para DL con G711: 37

Cada UE genera en promedio un tráfico de 105.6 Kbps por llamada

Figura 6.4 Caso ejemplo #2 en Interfaz gráfica de modelado de voz

**Caso de ejemplo #3**

- BW: 20 MHz
- Índice de configuración TDD: 6
- Índice de configuración de subtrama especial: 4
- Codec: G711
- MCS: 9 (m=2 y CR=0.61)

En este caso, se modifica el ancho de banda utilizado para visualizar una distribución de recursos en una rejilla cuya composición es de cien RBs (i.e. BW = 20MHz), lo que permite una mayor disponibilidad de recursos destinados a las llamadas de usuario.

Para este escenario y en comparación con el caso ejemplo #2, las condiciones de ancho de banda son mejores, pero los parámetros del Esquema de Modulación y Codificación (MCS) son desfavorables, pues se modula la voz con 2 bits para cada símbolo y se realiza la codificación del mensaje a una tasa de 0.61.

La situación aplicable a este ejemplo sería un UE localizado en el borde de una célula de cobertura del eNB que asigna los recursos durante ese instante, y que dado el ancho de banda otorgado, dicho UE cuenta con un plan de servicios preferente (e.g. Plan Gold, Plan Premium, Plan VIP, etc).

La visión del eNB en lo referente a capacidad para el soporte de llamadas simultáneas se traduciría a observar un determinado número de UEs que se encontrarán en el escenario arriba mencionado, y con la particularidad de que todos presentarán esta combinación de parámetros. La figura 6.3 muestra en el recuadro 'Características de llamada', el número de llamadas admitidas en cada enlace; esto es, para UL es posible que coexistan 47 llamadas con los mismos parámetros, y para DL 63 llamadas.

## Cálculo del throughput para LTE con estructura de trama tipo TDD

### 1.- Capa Física

Configuración de parámetros

BW de canal [MHz]: 20 PRBs: 100

TDD Config Index: 6 SS Config Index: 4

Indice de modulación: 2 [bits/symbol] (QPSK)

Los 'code rates' posibles de acuerdo al índice de modulación elegido, son los siguientes. (Seleccione uno):

C.R. elegido: 0.61

DL:UL: 3.5

DwPTS / GP/ UpPTS: 12/1/1

Resource Elements en DL: 54800

Resource Elements en UL: 41520

El throughput para DL sin code rate es de: 1.096e+07

El throughput para UL sin code rate es de: 8.304e+06

MCS	m	Code Rate
0	2	0.1100
1	2	0.1400
2	2	0.1700
3	2	0.2200

Aceptar

### Throughput teórico vs UE

Throughput Mbps vs UE

Legend: Th DownLink (G711) (blue), Th UpLink (G711) (red)

### 2.- Modelo de propagación

Modelo seleccionado: LTE Modelo vehicular

Obtener gráficas: Distancia Radial, SNR vs d, Prx vs d

Do [m]	100
ht [m]	1.5000
hr [m]	25
fc [Hz]	7001e+09
lambda [m]	0.1765
Amu [dB]	77.0512
Cf [dB]	-0.4233

### 3.- Selección de codec

Seleccione el codec a utilizar: G711 (64 Kbps)

Data Rate IP: 96 Kbps

Data Rate PHY: 105.6 Kbps

El code rate elegido es el siguiente: 0.61

### Throughput

El throughput máximo en Mbps para DL: Sin MIMO: 6.6856

El throughput máximo en Mbps para UL: 5.06544

### 4.- Cálculo y gráfico

Características de llamada

No. máximo de llamadas admitidas para UL con G711: 47

No. máximo de llamadas admitidas para DL con G711: 63

Cada UE genera en promedio un tráfico de 105.6 Kbps por llamada

Figura 6.5 Caso ejemplo #3 en Interfaz gráfica de modelado de voz

**Caso de ejemplo #4**

- BW: 20 MHz
- Índice de configuración TDD: 6
- Índice de configuración de subtrama especial: 4
- Codec: AMR 23.85
- MCS: 28 (m=6 y CR=0.81)

En este escenario se utilizan parámetros similares a los utilizados en los tres casos previos, la diferencia radica en el uso de un codec distinto al del resto, pero considerando un MCS de óptimas condiciones. El codec AMR 23.85 tiene por características soportar un payload de voz de 477 bits (59.65 Bytes), con intervalos de muestreo de 20 ms, es decir 50 intervalos de muestreo por segundo, y una tasa de transmisión a nivel de capa física de 44.7 kbps. Por sus características, este codec es usado para conexiones de banda ancha y por lo cual, se considera como un caso de ejemplo independiente para su comparación.

Analizando estos parámetros y comparándolos con el caso anterior, el throughput para enlaces de DL y UL aumenta casi 4 veces cuando se utiliza un mayor MCS y un codec de Banda Ancha aumenta casi diez veces la capacidad de llamadas. Un factor importante y que no se evalúa de forma sensible en la simulación, es la Calidad de Experiencia (QoE), pues la utilización de un codec de Banda Ancha implica una mejora en la calidad de la voz durante la llamada, debido al amplio ancho de banda que maneja (desde 50 Hz y hasta 22 KHz, cuando normalmente va de 200 Hz a 4 KHz) porque permite la transmisión de consonantes y entidades fonéticas que regularmente se pierden con un codec de Banda Angosta.

Los resultados para este caso ejemplo se muestran en la figura 6.4 donde las características de la capacidad para llamadas indican que en enlace de UL se permiten 451, y en enlace de DL se permiten hasta 595 por un solo eNB.

## Cálculo del throughput para LTE con estructura de trama tipo TDD

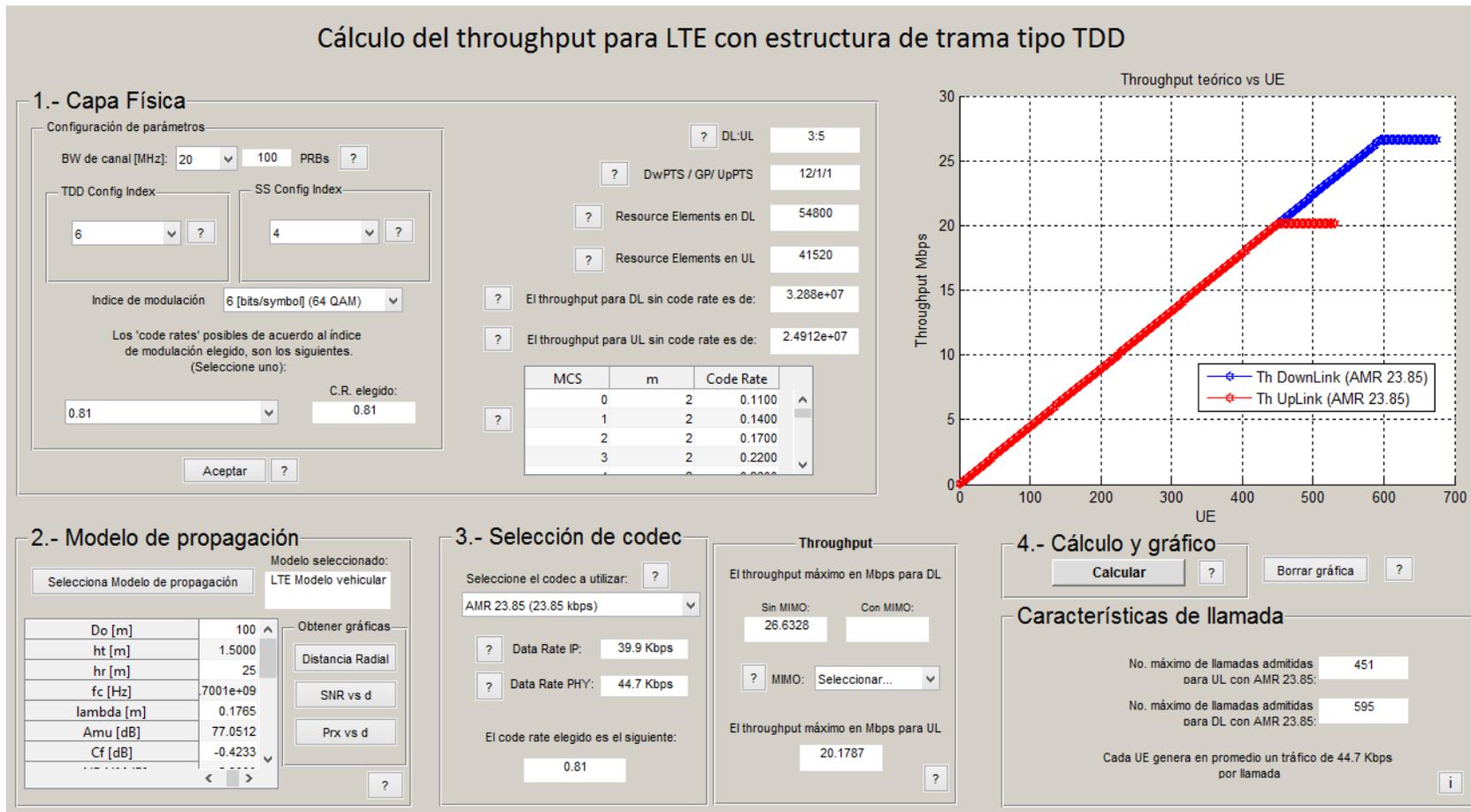


Figura 6.6 Caso ejemplo #4 en Interfaz gráfica de modelado de voz

**Caso de ejemplo #5**

- BW: 20 MHz
- Índice de configuración TDD: 5 (DL8:UL1:SS1)
- Índice de configuración de subtrama especial: 4
- Codec: AMR 12.20
- MCS: 28 (m=6 y CR=0.81)

Inicialmente observamos que la dinámica de uso es prioritaria para enlace de bajada por la elección del índice de configuración TDD número 5, siendo esta configuración la que cuenta con mayor cantidad de subtramas de DL de entre los siete posibles tipos de asignación de recurso en una trama. En este escenario (índice de configuración TDD) se cuenta únicamente con una subtrama especial. Por las condiciones del caso bajo análisis, la gráfica referenciada en la Figura 6.5 aparece con una diferencia muy amplia entre el throughput logrado para enlace de Uplink y el alcanzado para enlace de Downlink. Con precisión, se cuenta con 54.6264 Mbps en DL y con 4.38566 Mbps en UL.

Si se sustituyen los valores de este caso ejemplo en las fórmulas (4) y (3) planteadas al inicio de este tema, se obtienen los siguientes resultados:

$$Tasa\ de\ Tx\ PHY_{AMR\ 12.20}[bps] = \frac{(30.5\ [Bytes] + 52\ [Bytes]) * \left(8 \left[\frac{bits}{muestra}\right]\right)}{0.020\ [s]} = 33000\ [bps]$$

$$Número\ de\ llamadas_{DL} = \frac{54626400\ [bps]}{Tasa\ de\ Tx\ PHY_{c\acute{o}dec}[bps]} = \frac{54626400\ [bps]}{33000\ [bps]}$$

$$\mathbf{Número\ de\ llamadas_{DL} = 1655}$$

Aplicando el mismo procedimiento para el enlace de UL, se obtiene lo siguiente:

$$\mathbf{Número\ de\ llamadas_{UL} = 132}$$

## Cálculo del throughput para LTE con estructura de trama tipo TDD

### 1.- Capa Física

Configuración de parámetros

BW de canal [MHz]: 20 PRBs: 100

TDD Config Index: 5 SS Config Index: 4

Indice de modulación: 6 [bits/symbol] (64 QAM)

Los 'code rates' posibles de acuerdo al índice de modulación elegido, son los siguientes. (Seleccione uno):

C.R. elegido: 0.81

DL:UL: 8:1

DwPTS / GP/ UpPTS: 12/1/1

Resource Elements en DL: 112400

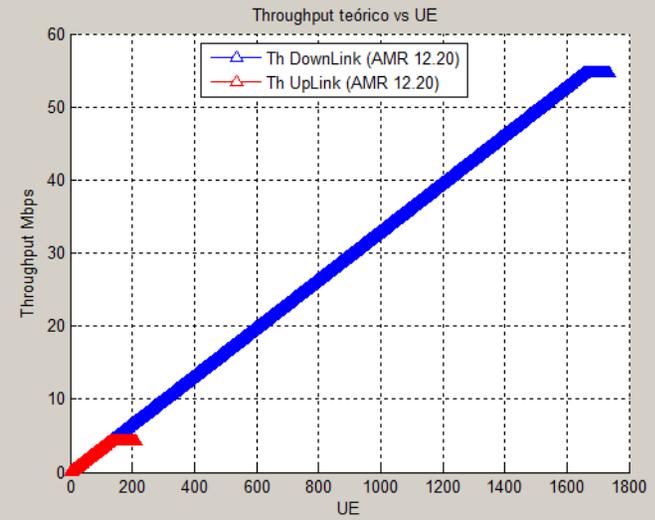
Resource Elements en UL: 9024

El throughput para DL sin code rate es de: 6.744e+07

El throughput para UL sin code rate es de: 5.4144e+06

MCS	m	Code Rate
0	2	0.1100
1	2	0.1400
2	2	0.1700
3	2	0.2200

Aceptar



### 2.- Modelo de propagación

Modelo seleccionado: LTE Modelo vehicular

Selecciona Modelo de propagación

Do [m]	100
ht [m]	1.5000
hr [m]	25
fc [Hz]	7001e+09
lambda [m]	0.1765
Amu [dB]	77.0512
Cf [dB]	-0.4233

Obtener gráficas

Distancia Radial

SNR vs d

Prx vs d

### 3.- Selección de codec

Seleccione el codec a utilizar: AMR 12.20 (12.2 kbps)

Data Rate IP: 28.2 Kbps

Data Rate PHY: 33 Kbps

El code rate elegido es el siguiente: 0.81

Throughput

El throughput máximo en Mbps para DL

Sin MIMO: 54.6264

Con MIMO:

MIMO: Seleccionar...

El throughput máximo en Mbps para UL

4.38566

### 4.- Cálculo y gráfico

Calcular

Borrar gráfica

Características de llamada

No. máximo de llamadas admitidas para UL con AMR 12.20: 132

No. máximo de llamadas admitidas para DL con AMR 12.20: 1655

Cada UE genera en promedio un tráfico de 33 Kbps por llamada

Figura 6.7 Caso ejemplo #5 en Interfaz gráfica de modelado de voz

**Caso de ejemplo #6**

- BW: 20 MHz
- Índice de configuración TDD: 5 (DL8:UL1:SS1)
- Índice de configuración de subtrama especial: 4
- Codec: AMR 23.85
- MCS: 28 (m=6 y CR=0.81)

Para este caso ejemplo se hace una comparación con el caso inmediato anterior, manteniendo el mismo valor de los parámetros excepto por el tipo de códec utilizado. Para este escenario se utiliza un codec AMR 23.85, cuyos resultados arrojan un menor número de llamadas simultáneas permitidas pues la cantidad de información que se transmite en este codec es mayor para el mismo intervalo de muestreo (i.e. 20 ms para cualquier AMR referenciado en el presente), lo que se ve reflejado como una mayor tasa de transmisión a nivel de capa física. La diferencia es que utilizando este tipo de codec, la calidad de las llamadas se ve optimizada, pues como ya se ha descrito, la utilización de este tipo de codificador-decodificador está orientada a conversaciones con una alta QoS.

En la gráfica arrojada dentro de la GUI, se observa que la pendiente de la recta es mayor en comparación con la gráfica del caso ejemplo #5, pues el eje horizontal representa el número de UE a los que se les brinda el servicio de manera simultánea, por lo tanto, al ser menor la capacidad de albergar cierto número de usuarios frente a un mismo throughput, es gráficamente visible la diferencia entre la utilización de un codec en específico.

Es importante remarcar que ante una diferencia gráfica, la comparación no considera directamente la calidad de experiencia del usuario (QoE). A diferencia de la Calidad de Servicio (QoS) donde se mide el desempeño de servicios de HW y SW entregados por un proveedor bajo los términos de un contrato, la QoE considera aspectos como la eficiencia, la facilidad de uso, la lealtad del cliente, la confiabilidad del cliente, la privacidad, el costo, entre otros.

## Cálculo del throughput para LTE con estructura de trama tipo TDD

### 1.- Capa Física

Configuración de parámetros

BW de canal [MHz]: 20 100 PRBs ?

TDD Config Index

5 ?

SS Config Index

4 ?

Indice de modulación 6 [bits/symbol] (64 QAM)

Los 'code rates' posibles de acuerdo al índice de modulación elegido, son los siguientes.  
(Seleccione uno):

0.81

C.R. elegido:

0.81

Aceptar ?

? DL:UL 8:1

? DwPTS / GP/ UpPTS 12/1/1

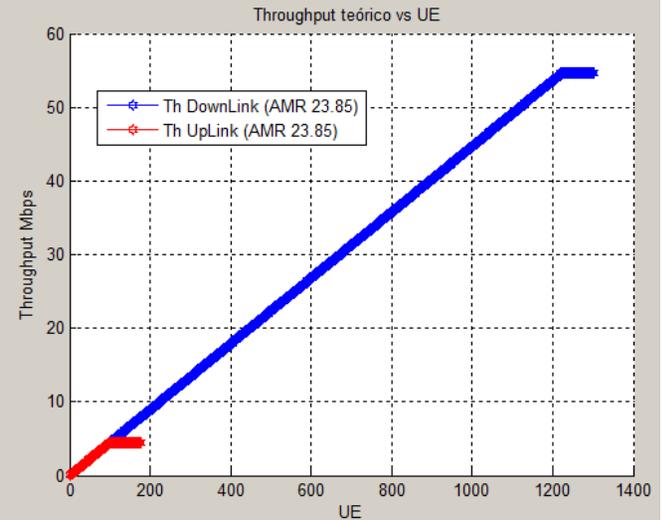
? Resource Elements en DL 112400

? Resource Elements en UL 9024

? El throughput para DL sin code rate es de: 6.744e+07

? El throughput para UL sin code rate es de: 5.4144e+06

MCS	m	Code Rate
0	2	0.1100
1	2	0.1400
2	2	0.1700
3	2	0.2200



### 2.- Modelo de propagación

Selecciona Modelo de propagación

Modelo seleccionado:

LTE Modelo vehicular

Do [m]	100
ht [m]	1.5000
hr [m]	25
fc [Hz]	7001e+09
lambda [m]	0.1765
Amu [dB]	77.0512
Cf [dB]	-0.4233

Obtener gráficas

Distancia Radial

SNR vs d

Prx vs d

### 3.- Selección de codec

Seleccione el codec a utilizar: ?

AMR 23.85 (23.85 kbps)

? Data Rate IP: 39.9 Kbps

? Data Rate PHY: 44.7 Kbps

El code rate elegido es el siguiente:

0.81

Throughput

El throughput máximo en Mbps para DL

Sin MIMO: 54.6264

Con MIMO:

? MIMO: Seleccionar...

El throughput máximo en Mbps para UL

4.38566

### 4.- Cálculo y gráfico

Calcular ?

Borrar gráfica ?

#### Características de llamada

No. máximo de llamadas admitidas para UL con AMR 23.85: 98

No. máximo de llamadas admitidas para DL con AMR 23.85: 1222

Cada UE genera en promedio un tráfico de 44.7 Kbps por llamada

Figura 6.8 Caso ejemplo #6 en Interfaz gráfica de modelado de voz

**Caso de ejemplo #7**

- BW: 20 MHz
- Índice de configuración TDD: 5 (DL8:UL1:SS1)
- Índice de configuración de subtrama especial: 4
- Codec: AMR 23.85
- MCS: 28 (m=6 y CR=0.81)
- MIMO: 8x8

Para este caso ejemplo, se prueba la misma configuración utilizada en el caso previo: índices en subtrama especial y TDD, el uso del mismo codec, el mismo esquema de modulación y codificación, pero se considera el uso de antenas MIMO con una configuración 8x8. Esta implementación de antenas en el eNB y el throughput máximo alcanzado, únicamente será soportado por las terminales móviles ‘Categoría 8’, las cuales se encuentran capacitadas para integrar ocho capas para multiplexado espacial en su diseño.

En la figura 6.7 se muestra enmarcado el valor del throughput. Esta cifra representa la tasa de transmisión de información en Megabits por segundo que puede mantener el eNB con esta configuración, y bajo la cual es posible entregar un determinado número de llamadas de acuerdo al codec en cuestión.

Para obtener el estimado de las llamadas permitidas con este nuevo throughput, se retoman las ecuaciones (4) y (3), quedando la disposición de la siguiente forma:

$$Tasa\ de\ Tx\ PHY_{AMR\ 23.85} [bps] = \frac{(59.625 [Bytes] + 52 [Bytes]) * \left(8 \left[\frac{bits}{muestra}\right]\right)}{0.020 [s]} = 44650 [bps]$$

$$Número\ de\ llamadas_{DL} = \frac{437011000 [bps]}{Tasa\ de\ Tx\ PHY_{c\acute{o}d\ e\ c} [bps]} = \frac{437011000 [bps]}{44650 [bps]}$$

$$\mathbf{Número\ de\ llamadas_{DL} = 9787}$$

Aplicando el mismo procedimiento para el enlace de UL, y considerando que para enlace de UL no se aplican técnicas de multiplexado espacial, los resultados obtenidos para este caso ejemplo comparados con los obtenidos en el caso ejemplo #6 son los mismos:

$$\mathbf{Número\ de\ llamadas_{UL} = 98}$$

## Cálculo del throughput para LTE con estructura de trama tipo TDD

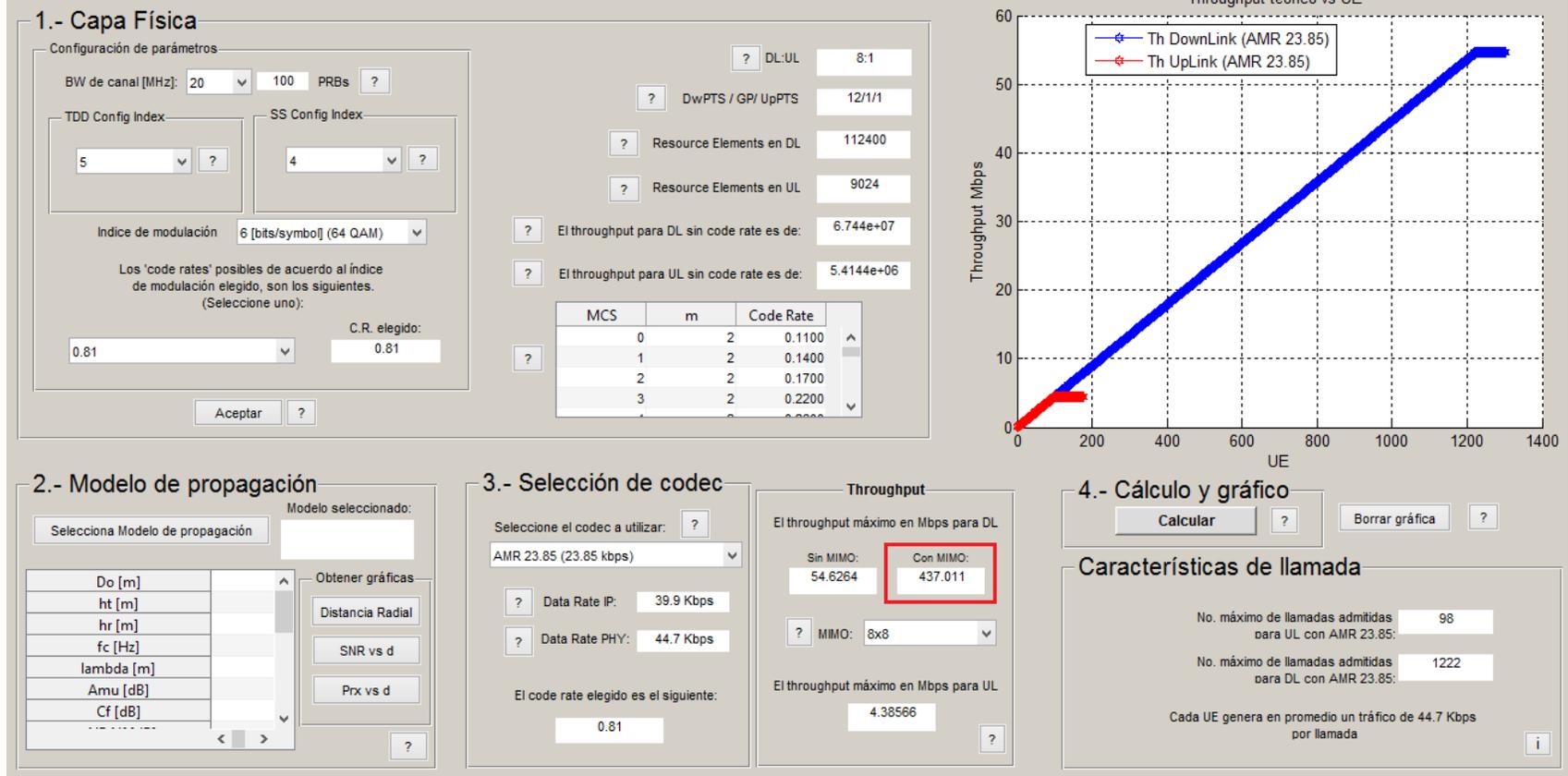


Figura 6.9 Caso ejemplo #7 en Interfaz gráfica de modelado de voz

## 6.4 Análisis combinado de tráfico de voz.

Para este tema se analiza mediante la comparación de resultados en gráfica, la viabilidad de algunas configuraciones frente a distintos escenarios.

### Uso de diferentes Codecs

El primer caso considera la comparación entre dos configuraciones del mismo tipo. Se dispone un arreglo en el cual se destinen la mayor cantidad de recursos posibles al enlace de downlink pero con la comparación de dos tres tipos de codecs y se analiza en la gráfica arrojada, cuál es el codec que presenta mayores ventajas frente a la misma configuración. De esta manera, será posible identificar cuál es el caso aplicativo óptimo para el despliegue.

A continuación los parámetros configurados en la interfaz gráfica:

- BW: 1.4 MHz
- Índice de configuración TDD: 5 (DL8:UL1:SS1)
- Índice de configuración de subtrama especial: 4
- MCS: 9 (m=2 y CR=0.61)
- Codecs:
  - G711 (64 kbps)
  - AMR-NB 4.75 (4.75 kbps )
  - AMR-WB 6.60 (6.60 kbps)

De acuerdo a lo planteado arriba, se pueden observar que los tres codecs son, dentro de sus respectivas categorías, aquellos que presentan el menor Bit Rate. El codec G711 en la categoría de codec para VoIP, el codec AMR 4.75 en la categoría de AMR *Narrow Band* o *Banda Angosta*, y el codec AMR-WB en categoría AMR de *Banda Ancha*.

En la Figura 6.8, 6.9, y 6.10 se observa el número de llamadas que soportarían los codecs en prueba.

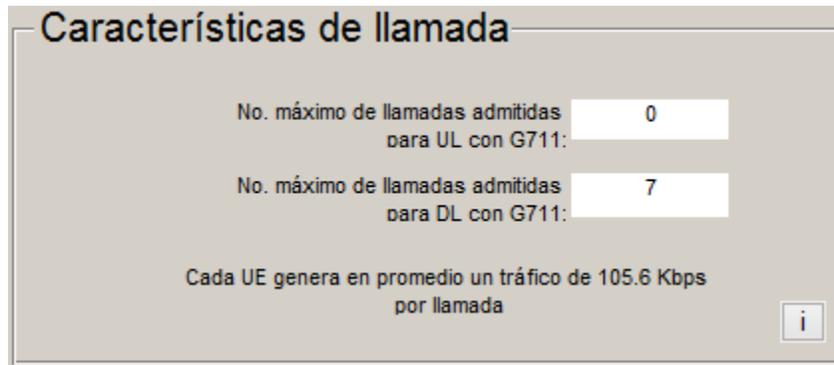


Figura 6.10 Llamadas admitidas por Codec G711

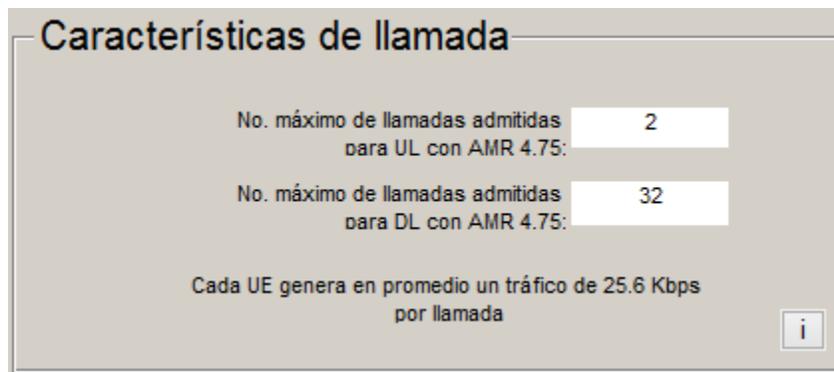


Figura 6.11 Llamadas admitidas por Codec AMR-NB 4.75

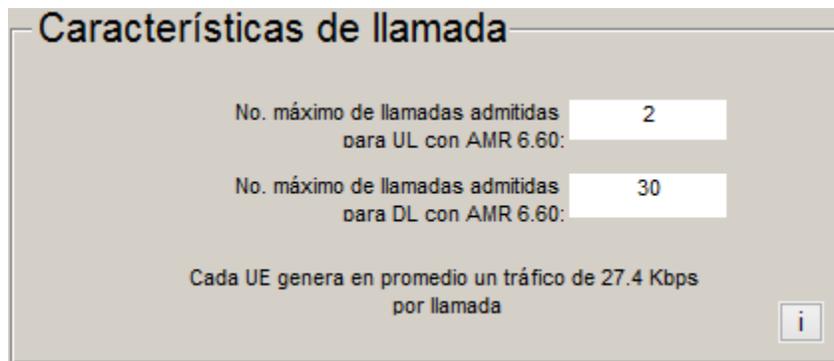


Figura 6.12 Llamadas admitidas por Codec AMR-WB 6.60

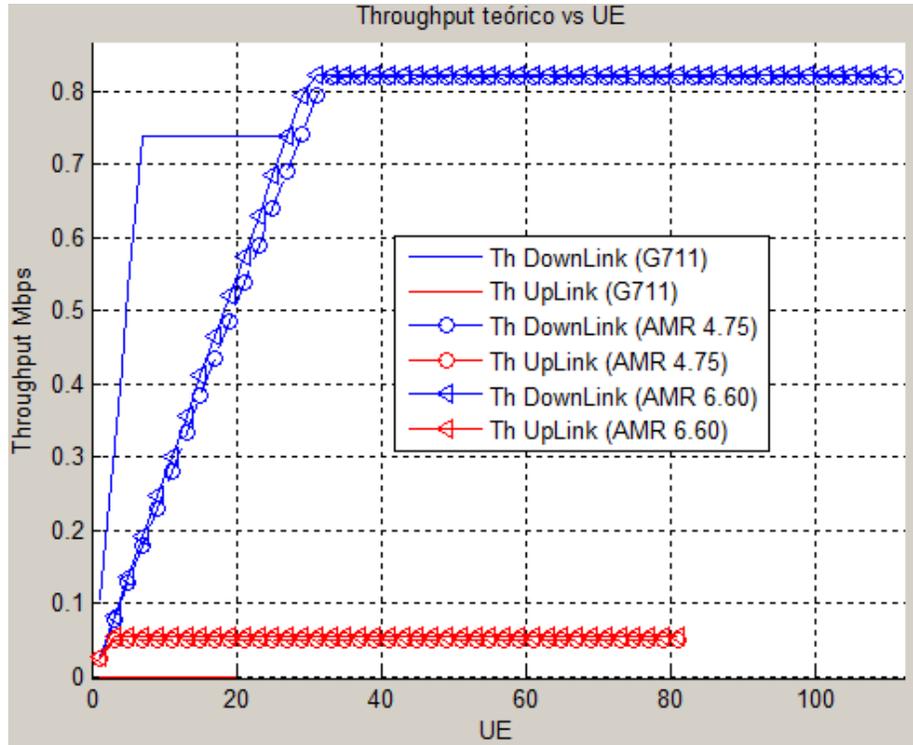


Figura 6.13 Gráfico comparativo de tres codecs bajo prueba

**Cálculo del throughput para LTE con estructura de trama tipo TDD**

### 1.- Capa Física

Configuración de parámetros

BW de canal [MHz]: 1.4 PRBs: 6

TDD Config Index: 5 SS Config Index: 4

Indice de modulación: 2 [bits/symbol] (QPSK)

C.R. elegido: 0.61

DL:UL: 8.1 DwPTS / GP/UpPTS: 12/1/1

Resource Elements en DL: 6744 Resource Elements en UL: 528

El throughput para DL sin code rate es de: 1.3488e+06

El throughput para UL sin code rate es de: 105600

MCS	m	Code Rate
0	2	0.1100
1	2	0.1400
2	2	0.1700
3	2	0.2200

### 2.- Modelo de propagación

Modelo seleccionado: LTE Modelo vehicular

Do [m]: 100 ht [m]: 1.5000 hr [m]: 25 fc [Hz]: 7001e+09 lambda [m]: 0.1765 Amu [dB]: 77.0512 Cf [dB]: -0.4233

Obtener gráficas: Distancia Radial, SNR vs d, Prx vs d

### 3.- Selección de codec

Seleccione el codec a utilizar: AMR 6.60 (6.6 kbps)

Data Rate IP: 22.6 Kbps Data Rate PHY: 27.4 Kbps

El code rate elegido es el siguiente: 0.61

### 4.- Cálculo y gráfico

El throughput máximo en Mbps para DL: Sin MIMO: 0.822768 Con MIMO: [ ]

El throughput máximo en Mbps para UL: 0.064416

Características de llamada: No. máximo de llamadas admitidas para UL con AMR 6.60: 2 No. máximo de llamadas admitidas para DL con AMR 6.60: 30

Cada UE genera en promedio un tráfico de 27.4 Kbps por llamada

Figura 6.14 GUI con parámetros de configuración para evaluación de codecs

Para este caso resulta conveniente utilizar un codec AMR NR por el ancho de banda del canal que se configuró (1.4 MHz).

Se observa que en esta configuración, entre mayor cantidad de Bytes en payload pueda abarcar el codec, resulta menos eficiente por tratarse de un número reducido de recursos de elemento a asignar, y por tanto, tratarse de un throughput bajo comparado con la implementación de cualquier otro ancho de banda para el canal (3, 5, 10, 15 o 20 MHz).

Este tipo de configuración puede ser aplicada por el eNB a una celda que se encuentra físicamente en una zona media de la cobertura total que ofrece la radiobase (Por el índice de modulación utilizado,  $m=2$ ) donde se tiene una buena intensidad de señal (No es necesario la aplicación de alta redundancia,  $CR=0.61$ ), y donde no existe una alta densidad de usuarios (por el ancho de banda del canal,  $BW=1.4$  MHz).

## **6.5 Estimaciones sobre la cantidad de usuarios admitidos.**

En este apartado se consideran casos individuales que evalúan las condiciones de las celdas para dimensionar la cantidad de usuarios admitidos por una controladora (i.e. eNodeB). Se consideran características de última generación como los son MIMO en multiplexado espacial, y se consideran codecs de banda ancha para el máximo aprovechamiento de los recursos de red, simulando una situación donde el envío y recepción de información sea la óptima. La Figura 6.13 muestra la configuración realizada para obtener un throughput máximo de 187.402 Mbps en DL, y en UL uno de 17.5427 Mbps. Inicialmente el throughput para ambos enlaces, sin el uso de MIMO, es similar y visualmente equiparable en la gráfica; la distancia entre las proyecciones no es mayor a dos cuadros de referencia.

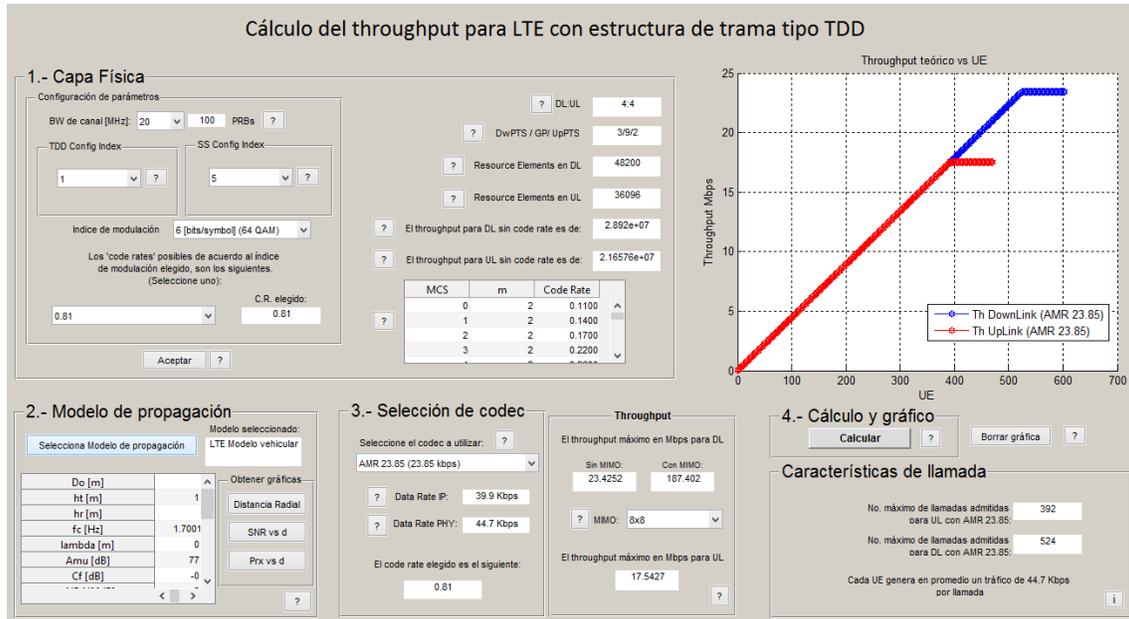


Figura 6.15 Estimaciones sobre la cantidad de usuarios

Realizando el estimado de llamadas que se soportarían con la configuración bajo evaluación, se obtiene lo siguiente:

$$Tasa\ de\ Tx\ PHY_{AMR\ 23.85} [bps] = \frac{(59.625 [Bytes] + 52 [Bytes]) * (8 \frac{bits}{muestra})}{0.020 [s]} = 44650 [bps]$$

**Sin MIMO:**

$$Número\ de\ llamadas_{DL} = \frac{Throughput [bps]}{Tasa\ de\ Tx\ PHY_{código} [bps]} = \frac{23425200 [bps]}{44650 [bps]}$$

$$Número\ de\ llamadas_{DL\ sin\ MIMO} = 524$$

**Con MIMO 8x8:**

$$\text{Número de llamadas}_{DL} = \frac{\text{Throughput [bps]}}{\text{Tasa de Tx PHY}_{\text{c\acute{o}dec} [\text{bps}]}]} = \frac{187402000[\text{bps}]}{44650 [\text{bps}]}$$

$$\text{Número de llamadas}_{DL \text{ MIMO } 8x8} = 4197$$

En enlace de UpLink el cálculo resulta de la siguiente manera:

$$\text{Número de llamadas}_{UL} = 98$$

El número de llamadas calculado refleja la cantidad de UEs simultáneos a los cuales se les pueden asignar recursos de red sin que exista un problema para la gestión de las sesiones. En este sentido, las sesiones son consideradas como llamadas de voz sobre IP.

Como parte de la interfaz se hace una separación para definir usuarios admitidos en enlace de bajada y usuarios admitidos en enlace de subida, esto para identificar la capacidad que se logra con cada link de datos, pero en un escenario de datos real es necesario evaluar como límite el número de llamadas permitidas en UL, pues al ser este link el que cuenta con la menor cantidad, se asegura que durante la utilización de los canales de control no se presente ninguna complicación tal como el ‘drop’ de algunos paquetes o de algunas subtramas a causa de la falta de identificación de elementos de recurso que indican la señalización ya sea en enlace de UL o de DL.

## 6.6 Caso real de uso: Monitoreo de VoLTE.

Se analizarán en un caso real y con usuarios proyectados de servicio VoLTE, la implementación sobre red actual de un prestador de servicios de comunicación móvil en México.

En el caso práctico, se utiliza la herramienta propuesta de modelado para evaluar la cantidad de llamadas permitidas que se establecerán para posteriormente realizar un dimensionamiento en la cantidad de *Streams* (i.e. contenido multimedia; voz y/o video en formato comprimido que se transmite y reproduce inmediatamente una vez recibido). En el caso práctico, el dimensionamiento busca la obtención de la cantidad de streams de voz para poder empatar con un parámetro de capacidad de nodos de monitoreo (Probes). La función principal de las ‘probes’ es la captura de tráfico para evaluación de condiciones de red en tiempo real. De esta manera, el dimensionamiento para voz sobre LTE deberá estar en función de las llamadas y los streams de RTP que cursen sobre los sitios a monitorear

A continuación se muestra la elección de los parámetros elegidos para obtener la cantidad de llamadas permitidas en las células a las que el eNB brinda el servicio. Se considera esta elección de parámetros como una propuesta teórica al caso real de suscriptores VoLTE y que será aplicada para toda la red con el fin de mostrar la utilidad de la interfaz en un proceso de dimensionamiento práctico.

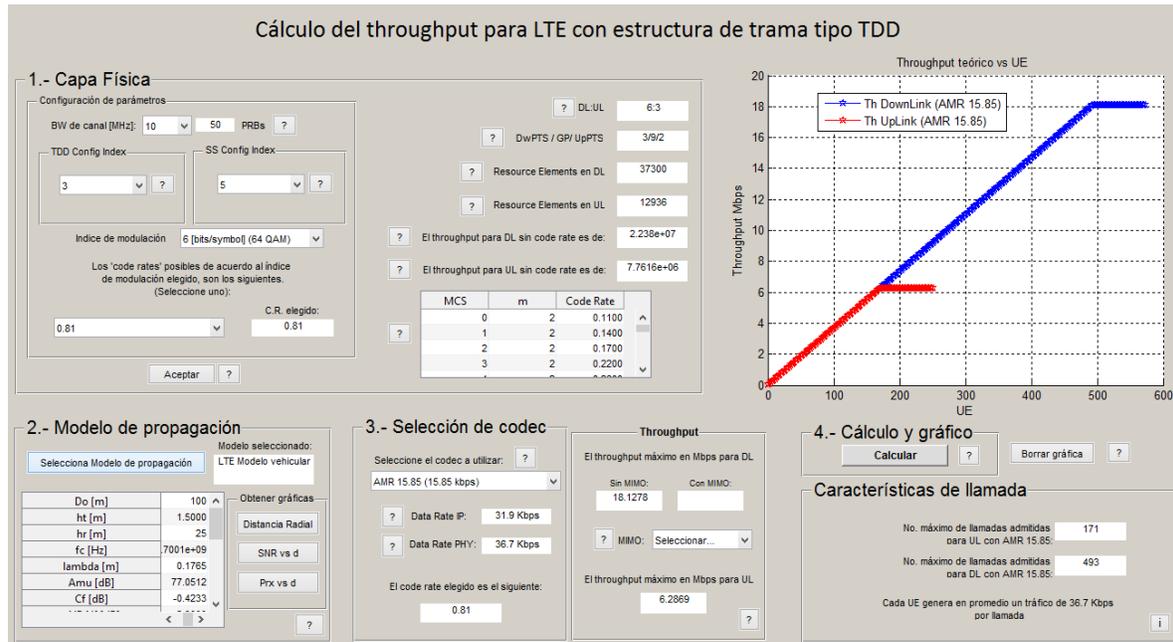


Figura 6.16 Obtención de llamadas admitidas para caso real VoLTE

En este caso real se consideran ciertas regiones clasificadas en zonas por fines prácticos de uso, mismos que son propios del prestador de servicio de telefonía celular en cuestión. Las zonas elegidas son secciones de la red donde se tiene desplegada la tecnología que posibilita entregar el servicio de voz sobre LTE, por lo que del tráfico total del sitio sólo se considera la parte de tráfico VoLTE. Así, en la Tabla 6.1 se observa una columna que considera esta premisa.

Zona	Región	Sitio	Tipo de sitio	Porción de tráfico VoLTE
1	1	Lomas	Access	20.287%
	2	Garmendia	Access	20.287%
	4	Anahuac	Core	50.000%
	4	Mayo	Access	29.713%
	4	Revolucion	Access	29.713%
	4	Guadalupe	Core	50.000%
2	5	Tlaquepaque	Access	50.000%
	5	Fresnos	Access	50.000%
	6	Tepic	Core	50.000%
	6	Campestre	Core	50.000%
3	9	Vallejo	Access	50.000%
	9	Nextengo	Access	50.000%
	9	Popotla	Core	50.000%
	9	Neza	Core	50.000%
4	7	Fuertes Heroica	Access	29.032%
	7	Insurgentes	Core	50.000%
	7	CTP Puebla	Access	29.032%
	8	Cascada	Access	20.968%
	8	Plaza	Core	50.000%
	8	Plaza	Access	20.968%

Tabla 6.1 Despliegue de VoLTE según prestador de servicios de telefonía móvil

Para dimensionar de forma adecuada, se tomó por base el número de suscriptores VoLTE para posteriormente evaluar el número de streams que se generan para la parte de voz (RTP Streams), se consideró la totalidad de quienes cuentan con el servicio de voz sobre LTE por cada zona, es decir, mediante la suma de algunos sitios por región se contabiliza que en año 2016, el *carrier* bajo estudio tiene un estimado de 4,774,105 suscriptores a nivel nacional de acuerdo a su cobertura en capacidad (véase Tabla 6.2).

Zona	Región	Suscriptores VoLTE 2016
1	1, 2, 3, 4	1.122.515
2	5, 6	1.112.453
3	9	1.222.673
4	7, 8	1.316.464

Tabla 6.2 Suscriptores de VoLTE

En cuanto a las suposiciones realizadas para el trabajo útil de dimensionamiento sobre monitoreo del servicio de VoLTE se tienen los siguientes puntos:

<b>Site redundancy factor:</b>	2
<b>BHCA per subscriber:</b>	1
<b>Unidirectional RTP streams per call:</b>	2
<b>Average Call hold time [seconds]:</b>	180
<b>SBC (Access) sides to monitor:</b>	2
<b>Avg INVITE SIP Call legs (Core):</b>	4
<b>Avg INVITE SIP Call legs (Access):</b>	2
<b>Additional SIP factor (REG, SUBS, etc):</b>	50%
<b>Bytes per SIP leg (INVITE):</b>	13050
<b>DNS Call legs:</b>	1
<b>DNS bytes:</b>	305
<b>Diameter Call legs (Core):</b>	3
<b>Diameter Call legs (Access):</b>	3
<b>Diameter bytes per leg:</b>	1500
<b>H.248 call legs:</b>	1
<b>H248 bytes:</b>	2500
<b>% calls to 3G/PSTN:</b>	25%

Tabla 6.3 Suposiciones realizadas para dimensionamiento de VoLTE

Las suposiciones realizadas se utilizan para calcular el número de de streams para que a su vez, se pueda identificar qué modelo de Probe es conveniente utilizar.

De la Tabla 6.3 es posible definir el número de RTP Streams a partir de las llamadas por segundo - CPS (Calls Per Second).

Al ser de interés la parte de ‘Acceso’ porque es donde los RTP Streams impactan para el cálculo de las probes, se tendrá un enfoque sobre los sitios de la Tabla 6.1 cuyo tipo es ‘Acceso’. Identificado esto, se procede a definir con ayuda de la GUI, el número de llamadas permitidas por eNB, que a su vez estarán configurados con los parámetros elegidos. Se muestra a continuación:

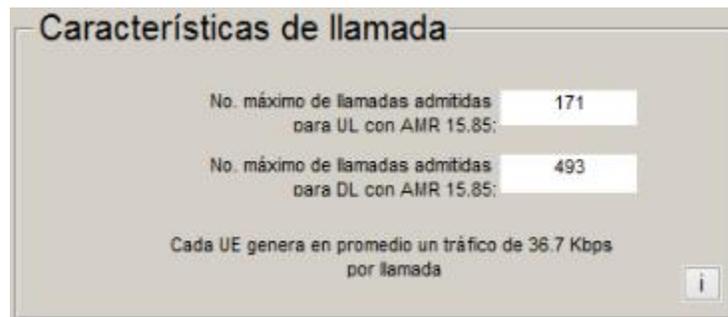


Figura 6.17 Llamadas permitidas de forma simultanea por cada eNB

De acuerdo a la Tabla 6.3, el número de intentos de llamada por un usuario en hora pico (Busy Hour Call Attempts) se infiere como uno. Siendo BHCA calculado en la hora más congestionada durante el día, es posible considerar que una llamada por usuario será el número máximo que se atienda a cualquier hora del día.

La baja demanda del servicio se debe a que el operador en cuestión no ha abierto de manera comercial en su red el uso de VoLTE a suscriptores que pudieran contratarlo como lo harían en un plan tarifario tal y como se adquieren hoy en día con cualquier operador.

De este comentario se define la siguiente relación en cuanto a las solicitudes de servicio:

$$1 \text{ suscriptor} = 1 \text{ llamada por hora}$$

En relación a la configuración elegida y mostrada en la Figura 6.14 donde cada eNB puede procesar 171 llamadas simultáneas, en la propia Tabla 6.3 se asume que el promedio de duración sea de 180 segundos; así, pueden existir hasta 20 bloques de 171 llamadas en una hora por cada Nodo B evolucionado. En consecuencia se pueden tener hasta 3420 llamadas que cada eNB procesaría en una hora, así, el número máximo de CPS (Calls Per Second) por eNB es: 0.95.

Para obtener el número de CPS por Zona es necesario multiplicar el número máximo de CPS en cada eNB por el número de eNBs en la Zona.

Zona	Regiones	Número de eNBs por Zona	CPS por Zona
1	1, 2, 3, 4	6,565	6,237
2	5, 6	6,506	6,181
3	9	7,150	6,793
4	7, 8	7,699	7,314

*Tabla 6.4 Relación de Zona-Llamadas por segundo*

Con el número de CPS por zona, se procede a realizar el cálculo para conocer la cantidad de información en Mbps que pasará por cada uno de los puntos de acceso al Core, por lo que se consideran los mensajes de señalización que se intercambian entre nodos y por ende, las ‘piernas’ o *legs* (secciones unidireccionales que contienen los mensajes de intercambio entre elementos de red).

Los cálculos para el dimensionamiento se basan en tres ecuaciones que a continuación se desglosan y que se relacionan con las variables asignadas a cada apartado de la tabla 6.5

Variable	Parámetro	Valor
a	Site redundancy factor:	2
b	BHCA per subscriber:	1
c	Unidirectional RTP streams per call:	2
d	Average Call hold time [seconds]:	180
e	SBC (Access) sides to monitor:	2
f	Avg INVITE SIP Call legs (Core):	4
g	Avg INVITE SIP Call legs (Access):	2
h	Additional SIP factor (REG, SUBS, etc):	50%
i	Bytes per SIP leg (INVITE):	13050
j	DNS Call legs:	1
k	DNS bytes:	305
l	Diameter Call legs (Core):	3
m	Diameter Call legs (Access):	3
n	Diameter bytes per leg:	1500
o	H.248 call legs:	1
p	H248 bytes:	2500
q	% calls to 3G/PSTN:	25%

Tabla 6.5 Variables a campos de dimensionamiento

$$Access\ CP\ [Mbps]_{por\ zona} = \frac{CPS_{por\ zona} * [(g * (1 + h) * i) + (m * n)] * 8}{1 * 10^6} \quad (5)$$

$$Core\ CP\ [Mbps]_{por\ zona} = \frac{CPS_{por\ zona} * [(f * (1 + h) * i) + (j * k) + (l * n) + (o * p * q)] * 8}{1 * 10^6} \quad (6)$$

$$Access\ RTP\ Streams = CPS_{por\ zona} * c * d * e \quad (7)$$

Mediante las ecuaciones (5), (6) y (7), se realizan los cálculos de dimensionamiento con los cuales se obtiene el tráfico de *Control Plane* (CP) o Plano de Control por Zona y en Mbps, así como los streams de RTP en acceso.

Al contar con el tráfico de CP, en Core y Acceso, y los streams de RTP por Zona, se multiplica el porcentaje del tráfico VoLTE de cada uno de los sitios con el que se identifica proporcionalmente la cantidad de información de la zona que pertenece a cada central.

Con el cálculo anterior, se conoce el mismo tipo de información (Mbps de CP en Core, Acceso, y el número de Streams RTP en Acceso) a nivel sitio.

Los información de la siguiente tabla es obtenida directamente por parte del fabricante de las probes, y refleja el tipo de equipos de monitoreo (i.e. Probes) que en su momento se ofertaron como parte de una propuesta comercial al prestador de servicios de telefonía móvil bajo estudio en el presente trabajo.

<b>G10 Probe Size</b>	<b>CP BW Mbps</b>	<b>UP BW Mbps</b>	<b>RTP Streams</b>	<b>1GE Copper Interfaces</b>	<b>10GE Fiber Interfaces</b>	<b>Chassis</b>
VoLTE (Core) (no IPSEC, Mapper) (G10) - Small	250	0	0	4	4	1
VoLTE (Core) (no IPSEC, Mapper) (G10) - Large	500	0	0	4	4	1
VoLTE (Access) (IPSEC+Mapper) (G10 Media) - Small	80	0	160000	4	4	2
VoLTE (Access) (IPSEC+Mapper) (G10 Media) - Large	150	0	250000	4	4	2

*Tabla 6.6 Tipos de Probes a instalar por fabricante*

Con ayuda de la Tabla 6.6, y con los cálculos previamente realizados, se mapea la capacidad que se dimensiona tener en la red, contra un tipo de Probe que se instalará a nivel Sitio. Es importante destacar que la capacidad de las probes de Acceso están relacionadas con el Ancho de Banda (BW) de CP y con un número definido de Streams RTP a soportar, haciendo notar que los primeros dos tipos de Probes son utilizados únicamente para manejar CP.

El detalle de los cálculos realizados y de los resultados para contabilizar las Probes necesarias se muestran en la Tabla 6.7.

Cálculo de tráfico VoLTE - (DIC '16)												Capacidad Soportada con Probes			Probes a utilizar						
Zona	Región	Sitio	Tipo	CPS por Zona	Core CP por Zona [Mbps]	Access CP por Zona [Mbps]	Access RTP Streams	% del total de Zona	Core Mbps	Access Mbps	RTP Streams en Acceso	Core Mbps	Access Mbps	Access RTP Streams	G10 VoLTE Core - Small (250 Mbps)	G10 VoLTE Core - Large (500 Mbps)	G10 VoLTE Access - Small (80Mbps 160KStr)	G10 VoLTE Access - Large (150Mbps 250KStr)			
1	1	Lomas	Access	6,237	4,177	2178	4,490,060	20.287%	0	442	910,894		600	1,000,000				4			
	2	Garmendia	Access					20.287%	0	442	910,894		600	1,000,000							4
	4	Anahuac	Core					50.000%	2089	0	0	2,250				1	4				
	4	Mayo	Access					29.713%	0	648	1,334,137		830	1,410,000				1			5
	4	Revolucion	Access					29.713%	0	648	1,334,137		830	1,410,000				1			5
	4	Guadalupe	Core					50.000%	2089	0	0	2,250				1	4				
2	5	Tlaquepaque	Access	6,181	4140	2158	4,449,812	50.000%	0	1080	2,224,906		1,350	2,250,000				9			
	5	Fresnos	Access					50.000%	0	1080	2,224,906		1,350	2,250,000						9	
	6	Tepic	Core					50.000%	2070	0	0	2,250				1	4				
	6	Campestre	Core					50.000%	2070	0	0	2,250				1	4				
3	9	Vallejo	Access	6,793	4550	2372	4,890,692	50.000%	0	1186	2,445,346		1,500	2,500,000				10			
	9	Nextengo	Access					50.000%	0	1186	2,445,346		1,500	2,500,000						10	
	9	Popotla	Core					50.000%	2275	0	0	2,500					5				
	9	Neza	Core					50.000%	2275	0	0	2,500					5				
4	7	Fuertes Heroica	Access	7,314	4899	2554	5,265,856	29.032%	0	742	1,528,797		980	1,660,000			1	6			
	7	Insurgentes	Core					50.000%	2450	0	0	2,500					5				
	7	CTP Puebla	Access					29.032%	0	742	1,528,797		980	1,660,000					1	6	
	8	Cascada	Access					20.968%	0	536	1,104,132		680	1,160,000					1	4	
	8	Plaza	Core					50.000%	2450	0	0	2,500						5			
	8	Plaza	Access					20.968%	0	536	1,104,132		680	1,160,000					1	4	
				26525	17766	9262	19,096,420					17768	9268	19,096,424	19000	11880	19,960,000	4	36	6	76

Tabla 6.7 Resultados de dimensionamiento

# CONCLUSIONES

---

## 7.1 Introducción

En este apartado se desglosan los fundamentos que sustentan la factibilidad del desarrollo de red en un sistema de cuarta generación como lo es LTE a través de una óptima planeación, comparación, y despliegue de elementos a configurar. Se proyectan posibles innovaciones para características propias de la red seccionando las áreas de oportunidad con el fin de identificar claramente los parámetros involucrados.

Por último se analizan las contribuciones del presente trabajo para los fines a los que se hacen referencia en un principio. Se identifican las ventajas que se obtienen con la herramienta desarrollada y los campos aplicativos en los que se posibilitaría una completa utilización de la interfaz.

## 7.2 Proyección a futuro de redes LTE.

La evolución de LTE no termina con el Release 10. Por el contrario, LTE continua evolucionando hacia nuevos lanzamientos, que a su vez brindan nuevas capacidades así como un profundo y mejorado desempeño de sistema para la tecnología de acceso de radio en cuestión. Dichas características de mejora, además de optimizar el desempeño de las aplicaciones existentes, pueden descubrir o verse motivadas por nuevas áreas de aplicativos e.g. automatización, transportación inteligente, seguridad, libros electrónicos, y una lista continuamente creciente en función de que dichas áreas se mantengan beneficiadas de la emergente conectividad móvil.

### **Eficiencia de energía de red**

El bajo consumo de energía para las terminales móviles ha sido un requerimiento importante desde hace cerca de veinte años con el surgimiento de terminales del tamaño de la mano. La tarea ha sido la reducción en el tamaño de la batería y la optimización del tiempo de batería. Hoy en día, el consumo reducido de energía en la red de acceso por radio (E-UTRAN) está recibiendo cada vez más atención por las siguientes razones:

- El costo de la energía por la operación promedio es por mucho, uno de los costos más significativos para el operador. Por tanto, reducir el consumo de energía implicaría reducción de costos operacionales para los operadores de red.
- En algunas áreas rurales puede que no sea posible conectar el eNB a la red de suministro eléctrico. Con una considerable reducción de consumo de energía, sería posible implementar paneles solares de un tamaño razonable para usarse como fuente de energía en lugar de los generadores a base de diesel usados actualmente.
- En el mundo actual, donde el consumo de energía y su respectivo impacto ambiental es valorado como uno de los retos para una visión a futuro, la industria móvil debe liderar la tendencia hacia un desarrollo con menor consumo de energía.

La reducción del consumo de energía de la red LTE, es en una visión general, un problema de implementación. Así, es importante asegurar que los principios básicos de la tecnología E-UTRAN permitan un bajo consumo de energía. Una característica clave es que el consumo de energía debe escalar con el uso de los recursos de radio, no sólo basado en un promedio, pero basado en situaciones a corto plazo. Esto es, durante los puntos de tiempo donde no exista tráfico, el consumo de energía debe ser reducido al mínimo absoluto, por ejemplo, evitando todas las transmisiones excepto las necesarias. Como se ha visto en una gran parte de este trabajo, la red LTE provee diversas herramientas que pueden ser usadas para la administración de recursos de radio. Sin embargo, la evolución de la red LTE debe profundizar la iniciativa para minimizar la transmisión de señales que no son estrictamente necesarias.

Esta parte se volverá más importante a medida que la red incremente su densidad con más nodos. En tales despliegues de red, que típicamente son redes heterogéneas, se opta por la integración de pico celdas para el incremento de tasas de transmisión de datos y no necesariamente por razones de capacidad. Así, la carga por celda será relativamente baja y cada pico celda estará regularmente ‘vacía’, lo que refiere un bajo consumo de energía notable en estado ‘idle’.

### **Comunicación tipo máquina**

LTE ha sido diseñado con un enfoque a servicios de datos y se han conjuntado esfuerzos para entregar tasas de transmisión mayores y valores de latencia cada vez menores para servicios como descarga de archivos y ‘web browsing’. Sin embargo con el aumento de la disponibilidad de la banda ancha móvil, la conectividad se ha convertido en una opción tangible para las comunicaciones de tipo máquina. Este tipo de comunicación abarca un amplio rango de aplicaciones (muchas de ellas soportadas para trabajar sobre LTE); desde el despliegue masivo de sensores alimentados por baterías de bajo costo para el control remoto de ciertas mediciones, y hasta cámaras de vigilancia. En este sentido, la comunicación con una cámara de vigilancia, por ejemplo, no es significativamente distinto a cargar un archivo; la diferencia es básicamente la necesidad de una mayor tasa de transmisión.

De acuerdo a algunas fuentes [32], 50 billones de conexiones, la mayor parte de ellas de comunicación tipo máquina, se esperan para el año 2020.

### **Comunicación UE-UE**

Un posible camino de evolución a largo plazo sería el extender la tecnología de acceso por radio LTE a un soporte de comunicación UE a UE de manera directa. Esto es, hacer posible para dos terminales móviles comunicarse directamente una con la otra sin la necesidad de viajar por la red.

Esta posibilidad ha sido estudiada por la academia desde hace algunos años, por ejemplo, como parte del proyecto de investigación Europea ‘WINNER’ [33].

Esta mejora podría utilizarse en escenarios donde no haya infraestructura de red disponible, por ejemplo en casos de seguridad nacional y/o pública. En situaciones donde exista infraestructura de red disponible pero la comunicación directa entre terminales sea más eficiente ya sea en términos de requerir un menor número de recursos de radio para la misma calidad de comunicación o para permitir una calidad de comunicación mejorada.

De cualquier manera, esta área se encuentra en una etapa inicial y los escenarios donde la comunicación dispositivo-dispositivo ofrece beneficios relacionados a la interacción basados en el estado de red, necesitan ser investigados con mayor profundidad.

## **7.3 Argumentación.**

El presente trabajo de investigación tiene por fundamento el desarrollo de una herramienta que actúe como apoyo para la debida planeación de un diseño de la red de acceso en redes de telefonía celular de cuarta generación. La planeación del diseño planteado es lograda mediante múltiples simulaciones donde de acuerdo a los distintos valores de los parámetros elegidos, se obtienen gráficas y valores que arrojan información relacionada al tipo de resultados que se pueden obtener. En capítulo seis es posible identificar casos ejemplo que se pueden asociar a un escenario en particular, donde se hacen notar las diferencias que existen luego de cambiar el valor de los campos mostrados en la interfaz gráfica. La comparación simultánea de escenarios también representa una parte importante del diseño a desplegar, pues se analiza la posibilidad de una mejora potencial; en implementación de codec, en requerimiento de distancia, en cantidad de elementos de recurso a asignar, en tipo de codificación, entre otros.

La correcta utilización de un ambiente de simulación como el presentado aquí, permite al desarrollador o al responsable en planificación de red, tener una amplia visión para que la gestión sea simple. Una vez identificada la implementación de la red, se puede trabajar con herramientas de monitoreo que a su vez utilizan KPIs y algoritmos de cálculo para generar reportes. Estos algoritmos de cálculos estadísticos se aplican al monitorear tráfico real. En este sentido es posible anticipar ciertos resultados en un flujo de datos que corren bajo un ambiente productivo, tal es el ejemplo que se tiene en la GUI aquí propuesta para la contabilidad del número de llamadas en el área de cobertura de un eNB comparado con un KPI ‘VoLTE Call Setup Success Rate’ medido en un área de cobertura de un eNB con la misma configuración propuesta en el modelo pero adaptada a un ambiente real.

## 7.4 Contribuciones.

Referente a la contribución realizada por el presente trabajo de tesis, está la funcionalidad de una herramienta que permite la valoración de parámetros para visualizar de forma previa la implementación de red que se tendrá en el enlace de radio y en lo asociado a la designación de recursos para los diferentes UEs que pretenden establecer una llamada. Se logra identificar una solución viable y entender el sentido lógico del funcionamiento de ‘scheduling’. Por lo anterior, la herramienta puede ser utilizada como una interfaz propietaria que tiene por objetivo la instrucción esquemática de los procesos que en el eNB se suscitan y a través de los cuales es tomada una decisión de priorización o destinación de recursos para los usuarios finales. La facilidad de uso en la herramienta y la simplificación de algunos conceptos (e.g. concepto de MCS), lo hacen conveniente como un apoyo en métodos de enseñanza dinámica. Es posible utilizar esta plataforma como un previo en el desarrollo de dimensionamiento para puesta en operación de infraestructura en una red productiva. Como se ejemplificó en capítulo 6, se manejó la información de un *carrier* activo actualmente en México, utilizando la herramienta para identificar la cantidad de llamadas permitidas para un tipo de enlace con características predeterminadas, y por ende, para calcular el número de streams de RTP, cuyo parámetro es necesario para conocer el número de probes de monitoreo a integrar para fundamentar el dimensionamiento de los equipos a solicitar.

La interfaz gráfica, al ser desarrollada en Matlab, presenta la característica de ser flexible ante cualquier cambio, de tal forma que sea posible añadir o modificar parcialmente los elementos que permiten la elaboración de las simulaciones. En este sentido, la capacidad de adaptación de la GUI es tan variada como lo dicten los estándares en la implementación de nuevos Realeses de la 3GPP para la evolución de las comunicaciones móviles.

---

# BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

---

- [1] Ericsson, *GPRS System Survey Student Book.*, 2010.
- [2] Dahlman Erik, *3G Evolution; HSPA and LTE for mobile broadband.*: Elsevier, 2007.
- [3] 3GPP, *ETSI TS 29.281: UMTS, LTE & GTP.*, 2009.
- [4] 3GPP, *TS 36.201, Technical Specification, Technical Specification LTE, Evolved Universal Radio Access (E-UTRA), Long Term Evolution (LTE) physical layer (Release 8).*, 2009.
- [5] <http://www.3gpp.org/about-3gpp/about-3gpp>.
- [6] <http://www.itu.int/net/ITU-R/index.asp?category=information&rlink=imt-advanced&lang=en>.
- [7] Holma Harri, Toskala Antti, *LTE for UMTS OFDMA & SC FDMA Based Radio Access.*: John Wiley & Sons, 2009.
- [8] GSMA, *VoLTE Service Description and implementation Guidelines.*, 2014.
- [9] Ericsson, *LTE/SAE System Overview Student Book.*, 2014.
- [10] Christopher Cox, *An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications.*
- [11] Ericsson, *EPC System Survey, Student Book.*, 2011.
- [12] 3GPP, *ETSI TS 36.214: LTE; E-UTRAN Physical layer measurements.*, 2009.
- [13] Ericsson, *EPC Signaling student book.*: Ericsson, 2011.
- [14] 3GPP, *ETSI TS36.322; LTE, E-UTRA & RLC protocol specification.*, 2008.
- [15] 3GPP, *ETSI TS 36.321; LTE, E-UTRA & MAC protocol specification.*, 2008.

- 
- 
- [16] 3GPP, *ETSI TS 36.300 LTE: E-UTRA & E-UTRAN.*, 2009.
- [17] 3GPP, *ETSI TS 36.410 LTE; E-UTRAN: SI general aspects and principles.*, 2009.
- [18] IETF, *RFC 4960: Streaming Control Transmission Protocol.*, 2007.
- [19] Roke Solutions, *LTE MAC scheduler & radio resource scheduling.*: Roke manor research, 2011.
- [20] Victor Rangel Licea, Raul Aquino Santos, Arthur Edwards Block, *Broadband Wireless Access Networks for 4G: Theory, Application, and Experimentation.*: IGI Global, 2014.
- [21] Ericsson, *LTE L12, Radio Network Functionality, Student Book.*: Ericsson, 2011.
- [22] Agusti Comes Ramon, *LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles.*: Fundacion Vodafone, 2010.
- [23] Juan Díaz, *Análisis de tráfico de voz sobre IP (VoIP) en redes LTE.*, 2014.
- [24] Mustafa Ergen, *Mobile broadband, including LTE & WiMAX.*: Springer, 2009.
- [25] Farooq Khan, *LTE for 4G mobile broadband.*: Cambridge University Press, 2009.
- [26] 3GPP, *TS36.323; E-UTRA & PDCP protocol specification.*, 2008.
- [27] IETF, *RFC 3095: Robust Header Compression.*: IETF, 2011.
- [28] 3GPP, Arnaud Meylan Huawei, *3GPP TSG RAN WG2 - Radio Layer 2, RRC and Radio Access Network Architecture.*, 2010.
- [29] Stylianos Karapantazis, Fotini-Niovi Pavlidou, *VoIP: A comprehensive survey on a promising technology.*: CN, 2009.
- [30] Kari Järvinen, Imed Bouazizi, *Media coding for the next generation mobile system LTE.*: Computer Communications, Volume 33, Issue 16, Octubre 2010.
- [31] 3GPP, *TS 23.216, technical specification, Technical Specification Group Services and System Aspects; Single Radio Voice Call Continuity (SRVCC), Stage 2 (Release 8).*
- [32] M. Alendal, *Operators need an ecosystem to support 50 billion connections.*: Ericsson Business, 2010.
- [33] (WINNER), *Wireless World Initiative New Radio, Eurescom.*, 2006.
- [34] Jose Manuel Huidobro, *Comunicaciones móviles: Sistemas GSM, UMTS y LTE, México.*: Alfa Omega, 2012.
- [35] Torrieri Don, *Principles of spread-spectrum communications systems.*: Springer, 2005.

- 
- [36] 3GPP, *TS 36.413 LTE:R-UTRA; SI AP.*, 2009.
- [37] 3GPP, *TS 29.061 3GPP PLMN and PDN.*, 2005.
- [38] 3GPP, *TS 36.420 E-UTRAN; X2 general aspects and principles.*, 2007.
- [39] Ferrer G Stremmler, *Introducción a los sistemas de comunicación.*: Addison-Wesley, 1993.
- [40] EETS, *Scheduling and DRX.*: EETS Wireless networks, 2013.
- [41] Sesia Stefania, *LTE the UMTS Long Term Evolution.*: Wiley, 2009.
- [42] Furht Borko & Ahson Syed, *Long Term Evolution, 3GPP LTE radio and cellular technology.*: CRC Press, 2009.
- [43] 3GPP, *ETSI TS 23.203; Technical specification group services and system aspects, Policy and charging control architecture.*: 3GPP, 2009.
- [44] Angel Ivanov, *TDD-LTE & FDD LTE, a basic comparison.*: Ascom, 2012.
- [45] Vebytra Sys, *Team paper: LTE TDD the preferred choose for mobile broadband.*
- [46] Matthew Baker, Alcatel Lucent, Chairman 3GPP TSG RAN WG1, *LTE-Advanced Physical Layer.*, 2009.
- [47] Tektronix, *Synchronous Optical Network SONET.*: The international Engineering Consortium.
- [48] [http://niviuk.free.fr/lte\\_resource\\_grid.html](http://niviuk.free.fr/lte_resource_grid.html).
- [49] Bernhard Schulz, *LTE Transmission modes and beamforming White Paper.*: Rhode & Schwarz, 2011.
- [50] Magnus Olsson, Shabam Sultana, Stefan Rommer, Lars Frid, Catherin Mulligan, *SAE and the evolved packet core: Driving the mobile broadband revolution.*: Elsevier, 2009.
- [51] Hu, Jung Fu-Cheng & Yang, *System and method of modulation and coding scheme adjustment for a LTE shared channel.*, 2010.
- [52] Inc., Qualcomm Technologies, *Delivering on the LTE Advanced promise.*, Marzo 2016.
- [53] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan S., *4G LTE/LTE-Advanced for mobile broadband.*: UK Elsevier, 2011.

---

# Apéndice A. Acrónimos y abreviaciones

---

3GPP	Third Generation Partnership Project
ACK	Acknowledge
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AMC	Adaptive Modulation and Coding
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
BCH	Broadcast Channel
BCCH	Broadcast Control Channel
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-AMPS	Digital-Advanced Mobile Phone System
DCI	Downlink Control Information
DCCH	Dedicated Control Channel
DM-RS	Demodulation Reference Signals

---

DL	Down link
DL-SCH	Downlink Shared Channel
DTCH	Dedicated Traffic Channel
DwPTS	Downlink Pilot Signal
EMM	EPS Mobility Management
eNB	evolved Node B
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
E-RAB	E-UTRAN Radio Access Bearer
FDD	Frequency Division Duplexing
FEC	Forward Error Correction
FTP	File Transfer Protocol
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
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HSPA	High Speed Packet Access
IFT	Instituto Federal de Telecomunicaciones
IMT-2000	International Mobile Telecommunications 2000
IMS	IP Multimedia Subsystem
IP	Internet Protocol
ISI	Inter Symbol Interference
LOS	Line Of Sight
LTE	Long Term Evolution
MAC	Media Access Control
MATLAB	Matrix Laboratory
MBMS	Multicast/Broadcast Multimedia System
MCH	Multicast Channel
MCCH	Multicast Control Channel
MCS	Modulation and Coding Scheme
MME	Mobility Management Entity
MMTel	Multi Media Telephony
MOS	Mean Opinion Square

---

MTCH	Multicast Traffic Channel
NACK	Negative Acknowledgment
NAS	Non-Access Stratum
Non GBR	Non-Guaranteed Bit Rate
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OPNET	Optimized Network Engineering Tools
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
QoE	Quality Of Experience
QoS	Quality Of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
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	Receptor
S-CH	Synchronization Channel
SC-OFDMA	Single Carrier-OFDMA
SCTP	Stream Control Transmission Protocol

---

S-GW	Serving 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
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Duplexing Division
TEID	Tunnel End point Identifier
TF	Transport Format
TFT	Traffic Format Template
TM	Transparent Mode
TTI	Transmission Time Interval
TX	Transmission o Transmitter
UE	User Equipment
UICC	Universal Integrated Circuit Card
UDP	User Datagram Protocol
UIT	Union International of Telecommunications
UL	Uplink
UL-SCH	Uplink Shared Channel
UM	Unacknowledgement Mode
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UpPTS	Uplink Pilot Signal
UTRAN	UMTS-Terrestrial Radio Access Network
VoIP	Voice over Ip
VoLGA	Voice over LTE via General Access
VoLTE	Voice over LTE
WiMAX	Worldwide Interoperability Microwave Access
Wifi	Wireless Fidelity (IEE 802.11)
W-LAN	Wireless Local Area Network

---

# Apéndice B. Código de Matlab

---

```
function varargout = LTEcalc(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',
mfilename, ...
'gui_Singleton',
gui_Singleton, ...
'gui_OpeningFcn',
@LTEcalc_OpeningFcn, ...
'gui_OutputFcn',
@LTEcalc_OutputFcn, ...
'gui_LayoutFcn', [] ,
...
'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
gui_State.gui_Callback =
str2func(varargin{1});
end

if nargin
[varargout{1:nargout}] =
gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function LTEcalc_OpeningFcn(hObject,
eventdata, handles, varargin)

MCS = [0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25
26 27 28];

m = [2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 4 4 4 4 4
4 4 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6];

cr = [0.1100 0.1400 0.1700 0.2200
0.2800 0.3400 0.4000 0.4700 0.5400 0.6100
0.3000 0.3400 0.3900 0.4400 0.5000 0.5500
0.5900 0.3900 0.4200 0.4600 0.5100 0.5500
0.6000 0.6400 0.6900 0.7400 0.7800
0.8100 0.8100];

tabla = [MCS' m' cr'];
set(handles.uitable1, 'data',
tabla);

handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

function varargout =
LTEcalc_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
varargout{1} = handles.output;

function pushbutton11_Callback(hObject,
eventdata, handles)

x = get(handles.popupmenu16, 'Value');
y = get(handles.popupmenu15, 'Value');
PRB =
str2num(get(handles.text102, 'string'));

tdd = x-1;
ss = y-1;
a = 12*14*PRB; %OFDM Symbols
%%16800 para 20 MHz; %a =
subcarriers*ofdm symbols *physical
resource blocks = 12*14*100; Se
multiplicara por el Num de subtramas para
UL y DL

%Cálculo de Resource Elements de acuerdo
%a PRBs para canal PUCCH

if (PRB==6)
pucch_res = 12*14*2; %12
subcarr*14 OFDM Sym*2 PRBs asignados a
canal PUCCH
```

```

else
elseif (PRB==15)
    pucch_res = 12*14*4;
elseif (PRB==25)
    pucch_res = 12*14*8;
elseif (PRB==50)
    pucch_res = 12*14*16;
elseif (PRB==75)
    pucch_res = 12*14*24;
elseif (PRB==100)
    pucch_res = 12*14*32;
end

cr = [0.1100 0.1400 0.1700 0.2200 0.2800
0.3400 0.4000 0.4700 0.5400 0.6100 0.3000
0.3400 0.3900 0.4400 0.5000 0.5500 0.5900
0.3900 0.4200 0.4600 0.5100 0.5500 0.6000
0.6400 0.6900 0.7400 0.7800 0.8100
0.8100];

modulationindex = get(handles.popupmenu17,
'value');

    if (modulationindex==1)
set(handles.popupmenu18, 'String',
'Seleccione índice de modulación...');
        m =
msgbox({'Índice de modulación inválido' ''
'Seleccione un índice de modulación'},
'Error','error');

        elseif (modulationindex==2)
            m = 2;
            elements =
cr(1:10);

set(handles.popupmenu18, 'String',
elements);

        elseif (modulationindex==3)
            m = 4;
            elements =
cr(11:17);

set(handles.popupmenu18, 'String',
elements);

        elseif (modulationindex==4)
            m = 6;
            elements =
cr(18:28);

set(handles.popupmenu18, 'String',
elements);

else
end

if (m~=0)
if ((tdd==0)&&(ss==0))
    set(handles.text1,'String', '2:6');
    set(handles.text2,'String', '3/10/1');
    dwpts=3;
    gp=10;
    uppts=1;
    subul=6; %subtramas uplink
    subdl=2; %subtramas downlink
    ss=2; %special subframes in the frame

%DOWNLINK

    totresdl=a*subdl; %a = 12*14*PRB;
    % pdcchresdl=12*4*subdl; %12*4*subdl
--4 símbolos (max) para cada subportadora
en 12 subportadoras-- %360 OFDM symbols in
tdd=0 ss=0
    % rsdl=6*6*subdl; %reference signal
DL -- 1188 para 100PRBs=20MHz
    % sschres=62*2; %secondary
synchronization channel resources
    % pbchres=12*4*subdl; %physical
broadcast channel resources
    % pdsch=totresdl-pdcchresdl-rsdl-
sschres-pbchres;

    pdsch = 206*PRB; %206 REs para PDSCH

    set(handles.text4,'string',pdsch);

%UPLINK

    % totresul=(a*subul)+(24*PRB); %total
resources uplink = 12*14*subul+(12 REs
para UL en cada subtrama especial - son
dos subtramas especiales en el conf index)
    % pucchres=pucch_res*subul; %2688 para
100 PRB = 20MHz
    % dmrsres=11664; %
    % srsres=4032;
    % prachres=3024; %72 subcarriers * 14
OFDM symbols * subtramas
    % pusch=totresul-pucchres-dmrsres-
srsres-prachres;

    totresul=(a*subul)+(24*PRB);
    pucch = pucch_res*subul;
    dmrsres = 24*subul*PRB; %24 REs por
cada subtrama de UL y por cada PRB
    srs = 12*subul*PRB;
    pusch = totresul-pucch-dmrsres-srs;

```

```

set(handles.text9,'string',pusch);

thdl=pdsch*m*100;
thul=pusch*m*100;

set(handles.text13,'string',thdl);
set(handles.text15,'string',thul);

elseif ((tdd==0)&&(ss==1))
set(handles.text1,'String', '2:6');
set(handles.text2,'String', '9/4/1');

dwpts=9;
gp=4;
uppts=1;
subul=6;
subdl=2;
ss=2;

%      b=24780;%REs por subtrama DL
%      %%%%%%%%%Cuenta de REs de las
subtramas especiales%%%%%%%%
%      totresss=1200*dwpts*ss; % 12 *100
%      pdcchss=2400*ss;
%      psch=72*ss;
%      rsss=4*100*ss; %resources special
subframe
%      c=totresss-pdcchss-psch-rsss;
%      %%%%%%%%%Cuenta total para DL
%      d=b+c;
%      %%%%%%%%%Cuenta de REs para
UL%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%DL
pdsch=342*PRB;
%UL
totresul=(a*subul)+(24*PRB);
pucch = pucch_res*subul;
dmrsres = 24*subul*PRB;
srs = 12*subul*PRB;
pusch = totresul-pucch-dmrsres-srs;

set(handles.text4,'string',pdsch);
set(handles.text9,'string',pusch);

thdl=pdsch*m*100;
thul=pusch*m*100;

set(handles.text13,'string',thdl);
set(handles.text15,'string',thul);

elseif ((tdd==0)&&(ss==2))
set(handles.text1,'String', '2:6');
set(handles.text2,'String', '10/3/1');

dwpts=10;
gp=3;
uppts=1;
subul=6;
subdl=2;
ss=2;

%DL
d=366*PRB; %pdsch
%UL
totresul=(a*subul)+(24*PRB);
pucch = pucch_res*subul;
dmrsres = 24*subul*PRB;
srs = 12*subul*PRB;
pusch = totresul-pucch-dmrsres-srs;

set(handles.text4,'string',d);
set(handles.text9,'string',pusch);

thdl=d*m*100;
thul=pusch*m*100;

set(handles.text13,'string',thdl);
set(handles.text15,'string',thul);

elseif ((tdd==0)&&(ss==3))
set(handles.text1,'String', '2:6');
set(handles.text2,'String', '11/2/1');

dwpts=11;
gp=2;
uppts=1;
subul=6;
subdl=2;
ss=2;

%DL
d=390*PRB; %pdsch
%UL
totresul=(a*subul)+(24*PRB);
pucch = pucch_res*subul;
dmrsres = 24*subul*PRB;
srs = 12*subul*PRB;
pusch = totresul-pucch-dmrsres-srs;

set(handles.text4,'string',d);
set(handles.text9,'string',pusch);

thdl=d*m*100;
thul=pusch*m*100;

set(handles.text13,'string',thdl);
set(handles.text15,'string',thul);

elseif ((tdd==0)&&(ss==4))

```

---

```

set(handles.text1,'String','2:6');
set(handles.text2,'String','12/1/1');

dwpts=12;
gp=1;
uppts=1;
subul=6;
subdl=2;
ss=2;

%DL
d=410*PRB; %pdsch
%UL
totresul=(a*subul)+(24*PRB);
pucch = pucch_res*subul;
dmrsres = 24*subul*PRB;
srs = 12*subul*PRB;
pusch = totresul-pucch-dmrsres-srs;

set(handles.text4,'string',d);
set(handles.text9,'string',pusch);

thdl=d*m*100;
thul=pusch*m*100;

set(handles.text13,'string',thdl);
set(handles.text15,'string',thul);

elseif ((tdd==0)&&(ss==5))
set(handles.text1,'String','2:6');
set(handles.text2,'String','3/9/2');

dwpts=3;
gp=9;
uppts=2;
subul=6;
subdl=2;
ss=2;

%DL
d=206*PRB; %pdsch
%UL
totresul=(a*subul)+(24*2*PRB);
pucch = pucch_res*subul;
dmrsres = 24*subul*PRB;
srs = 12*subul*PRB;
pusch = totresul-pucch-dmrsres-srs;

set(handles.text4,'string',d);
set(handles.text9,'string',pusch);

thdl=d*m*100;
thul=pusch*m*100;

set(handles.text13,'string',thdl);
set(handles.text15,'string',thul);

elseif ((tdd==0)&&(ss==6))
set(handles.text1,'String','2:6');
set(handles.text2,'String','9/3/2');

dwpts=9;
gp=3;
uppts=2;
subul=6;
subdl=2;
ss=2;

%DL
d=342*PRB; %pdsch
%UL
totresul=(a*subul)+(24*2*PRB);
pucch = pucch_res*subul;
dmrsres = 24*subul*PRB;
srs = 12*subul*PRB;
pusch = totresul-pucch-dmrsres-srs;

set(handles.text4,'string',d);
set(handles.text9,'string',pusch);

thdl=d*m*100;
thul=pusch*m*100;

set(handles.text13,'string',thdl);
set(handles.text15,'string',thul);

elseif ((tdd==0)&&(ss==7))
set(handles.text1,'String','2:6');
set(handles.text2,'String','10/2/2');

dwpts=10;
gp=2;
uppts=2;
subul=6;
subdl=2;
ss=2;

%DL
d=366*PRB; %pdsch
%UL
totresul=(a*subul)+(24*2*PRB);
pucch = pucch_res*subul;
dmrsres = 24*subul*PRB;
srs = 12*subul*PRB;
pusch = totresul-pucch-dmrsres-srs;

set(handles.text4,'string',d);
set(handles.text9,'string',pusch);

thdl=d*m*100;
thul=pusch*m*100;

set(handles.text13,'string',thdl);

```

---

---

```

set(handles.text15, 'string', thul);

elseif ((tdd==0) && (ss==8))
    set(handles.text1, 'String', '2:6');
    set(handles.text2, 'String', '11/1/2');

    dwpts=11;
    gp=1;
    uppts=2;
    subul=6;
    subdl=2;
    ss=2;

%DL
d=390*PRB; %pdsch
%UL
totresul=(a*subul)+(24*2*PRB);
pucch = pucch_res*subul;
dmrsres = 24*subul*PRB;
srs = 12*subul*PRB;
pusch = totresul-pucch-dmrsres-srs;

set(handles.text4, 'string', d);
set(handles.text9, 'string', pusch);

thdl=d*m*100;
thul=pusch*m*100;

set(handles.text13, 'string', thdl);
set(handles.text15, 'string', thul);

elseif ((tdd==1) && (ss==1))
    set(handles.text1, 'String', '4:4');
    set(handles.text2, 'String', '9/4/1');

    dwpts=9;
    gp=4;
    uppts=1;
    subul=4;
    subdl=4;
    ss=2;

%DL
d=618*PRB; %pdsch
%UL
totresul=(a*subul)+(24*PRB);
pucch = pucch_res*subul;
dmrsres = 24*subul*PRB;
srs = 12*subul*PRB;
pusch = totresul-pucch-dmrsres-srs;

set(handles.text4, 'string', d);
set(handles.text9, 'string', pusch);

thdl=d*m*100;
thul=pusch*m*100;

set(handles.text13, 'string', thdl);
set(handles.text15, 'string', thul);

elseif ((tdd==1) && (ss==0))
    set(handles.text1, 'String', '4:4');
    set(handles.text2, 'String', '3/10/1');

    dwpts=3;
    gp=10;
    uppts=1;
    subul=4;
    subdl=4;
    ss=2;

%DL
d=482*PRB; %pdsch
%UL
totresul=(a*subul)+(24*PRB);
pucch = pucch_res*subul;
dmrsres = 24*subul*PRB;
srs = 12*subul*PRB;
pusch = totresul-pucch-dmrsres-srs;

set(handles.text4, 'string', d);
set(handles.text9, 'string', pusch);

thdl=d*m*100;
thul=pusch*m*100;

set(handles.text13, 'string', thdl);

```

```

set(handles.text15, 'string', thul);

elseif ((tdd==1) && (ss==1))
    set(handles.text1, 'String', '4:4');
    set(handles.text2, 'String', '9/4/1');

    dwpts=9;
    gp=4;
    uppts=1;
    subul=4;
    subdl=4;
    ss=2;

%DL
d=618*PRB; %pdsch
%UL
totresul=(a*subul)+(24*PRB);
pucch = pucch_res*subul;
dmrsres = 24*subul*PRB;
srs = 12*subul*PRB;
pusch = totresul-pucch-dmrsres-srs;

set(handles.text4, 'string', d);
set(handles.text9, 'string', pusch);

thdl=d*m*100;
thul=pusch*m*100;

set(handles.text13, 'string', thdl);
set(handles.text15, 'string', thul);

•
•
•

elseif ((tdd==6) && (ss==8))
    set(handles.text1, 'String', '3:5');
    set(handles.text2, 'String', '11/1/2');

    dwpts=9;
    gp=4;
    uppts=1;
    subul=5;
    subdl=3;
    ss=2;

%DL
d=528*PRB; %pdsch
%UL
totresul=(a*subul)+(24*ss*PRB); %24
REs (2 símbolos y 12 subportadoras en un
PRB; sólo hay una Subtrama especial -
UpPTS)

```

---

```

pucch = pucch_res*subul;
dmrsres = 24*subul*PRB;
srs = 12*subul*PRB;
pusch = totrresul-pucch-dmrsres-srs;

set(handles.text4,'string',d);
set(handles.text9,'string',pusch);

thdl=d*m*100;
thul=pusch*m*100;

set(handles.text13,'string',thdl);
set(handles.text15,'string',thul);

end

function tddindex_Callback(hObject,
eventdata, handles)
function tddindex_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))

set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function ssindex_Callback(hObject,
eventdata, handles)
function ssindex_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))

set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function edit1_Callback(hObject,
eventdata, handles)
function edit1_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))

set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function popupmenu14_Callback(hObject,
eventdata, handles)
codec = get(hObject, 'value');
thdl =
str2num(get(handles.text13,'string'));
thul =
str2num(get(handles.text15,'string'));

switch codec

case 3

set(handles.text68,'string','96
Kbps'); % 96 kbps =
(80+40[Bytes])*8[bits]*100[pkt/s]/1000[ms]
set(handles.text70,'string','105.6
Kbps'); %105.6 kbps
=(80+52[Bytes])*8[bits]*100[pkt/s]/1000[ms
]

MCS = [0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25
26 27 28];

m = [2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 4 4 4 4 4
4 4 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6];

cr = [0.1100 0.1400 0.1700 0.2200
0.2800 0.3400 0.4000 0.4700 0.5400 0.6100
0.3000 0.3400 0.3900 0.4400 0.5000 0.5500
0.5900 0.3900 0.4200 0.4600 0.5100 0.5500
0.6000 0.6400 0.6900 0.7400 0.7800
0.8100 0.8100];

tabla = [MCS' m' cr'];
set(handles.uitable1, 'data',
tabla);

•
•
•

case 30

set(handles.text68,'string','39.1
Kbps');
set(handles.text70,'string','43.9
Kbps');

MCS = [0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25
26 27 28];

m = [2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 4 4 4 4 4
4 4 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6];

cr = [0.1100 0.1400 0.1700 0.2200
0.2800 0.3400 0.4000 0.4700 0.5400 0.6100
0.3000 0.3400 0.3900 0.4400 0.5000 0.5500
0.5900 0.3900 0.4200 0.4600 0.5100 0.5500
0.6000 0.6400 0.6900 0.7400 0.7800
0.8100 0.8100];

```

```

        tabla = [MCS' m' cr'];
        set(handles.uitable1, 'data',
tabla);

        case 31

            set(handles.text68,'string','39.9
Kbps');
            set(handles.text70,'string','44.7
Kbps');

            MCS = [0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25
26 27 28];

            m = [2 2 2 2 2 2 2 2 2 4 4 4 4 4
4 4 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6];

            cr = [0.1100 0.1400 0.1700 0.2200
0.2800 0.3400 0.4000 0.4700 0.5400 0.6100
0.3000 0.3400 0.3900 0.4400 0.5000 0.5500
0.5900 0.3900 0.4200 0.4600 0.5100 0.5500
0.6000 0.6400 0.6900 0.7400 0.7800
0.8100 0.8100];

            tabla = [MCS' m' cr'];
            set(handles.uitable1, 'data',
tabla);

            otherwise

                set(handles.text68,'string','');
                set(handles.text70,'string','');

        end

function popupmenu14_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))

set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit5_Callback(hObject,
eventdata, handles)
function edit5_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))

set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function pushbutton8_Callback(hObject,
eventdata, handles)
thdl =
str2num(get(handles.text13,'string'));

```

```

thul =
str2num(get(handles.text15,'string'));

codec = get(handles.popupmenu14, 'value');
coderate = str2num(get(handles.text89,
'string'));

        if (codec==3)

            thulcr=(thul*coderate)/1000000;
            set(handles.text74,'string',thulcr);

            thdlcr=(thdl*coderate)/1000000;
            set(handles.text76,'string',thdlcr);

            set(handles.text77,'string', 'Cada
UE genera en promedio un tráfico de 105.6
Kbps por llamada');

            voip1=thulcr/0.1056; %105.6 kbps
data rate PHY ([105.6 kbps/lx10^6] = .1056
Mbps)
            calls1=floor(voip1);

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

            set(handles.text78,'string', 'No.
máximo de llamadas admitidas para UL con
G711:');
            set(handles.text80,'string', 'No.
máximo de llamadas admitidas para DL con
G711:');

            set(handles.text79,'string',
calls1);
            set(handles.text81,'string',
calls2);

            ague=1;

            %%%%%%%%%%%%%%%%% GENERACION DE
LAS GRAFICAS UL-DL %%%%%%%%%%%%%%%%%

            for i=1:ague:calls1+20
                for j=i:ague:calls1
                    x=0.1056*i;
                    end
                    %disp(['Numero de
UES:',num2str(i)] );
                    x=x*1;

            %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
                    %disp(['Throughput Mbbps:
',num2str(x)] );

            end

```

```

for p=1:ague:calls2+20
    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+20;
        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+20;
vec3=[vec1 vec0];

        axes(handles.axes1);

% plot(vec2,vec3,'-r')
grid on;
hold on

        %%GRAFICA PARA EL DOWNLINK %%

        a2=calls2+20;
        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+20;
vec32=[vec12 vec02];

        axes(handles.axes1);

graph = plot(vec22,vec32,'-
b',vec2,vec3,'-r');
grid on;

        xlabel('UE');
        ylabel('Throughput Mbps');
        title('Throughput teórico vs UE
');
        legend(graph,'Th DownLink (G711)',
'Th UpLink (G711)');

        return

elseif(codec==31)

        datrate=0.0447; %valor de Data rate
en capa PHY

        %%%Cálculo del th con el code
rate%%
        thulcr=(thul*coderate)/1000000;

set(handles.text74,'string',thulcr);

        thdlcr=(thdl*coderate)/1000000;

set(handles.text76,'string',thdlcr);

        set(handles.text77,'string', 'Cada
UE genera en promedio un tráfico de 33.6
Kbps por llamada');

        %%% Cálculo del numero de
llamadas admitidas con G711
        %%%
        voip1=thulcr/datrate;
        calls1=floor(voip1);

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

        set(handles.text78,'string', 'No.
máximo de llamadas admitidas para UL con
AMR 23.85:');
        set(handles.text80,'string', 'No.
máximo de llamadas admitidas para DL con
AMR 23.85:');

        set(handles.text79,'string',
calls1);
        set(handles.text81,'string',
calls2);

        ague=2;

        %%% GENERACION DE
LAS GRAFICAS UL-DL %%%

```

```

for i=1:ague:calls1+80
    for j=i:ague:calls1
        x=datrate*i;
    end
    %disp(['Numero de
UES:',num2str(i)] );
    x=x*1;

end

for p=1:ague:calls2+80
    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+80;
    b=(a-calls1)/ague;
    c=ones(1,b);
    d=datrate*calls1;
    vec0=d*c;

vec1=datrate:datrate*ague:datrate*calls1;
vec2=1:ague:calls1+80;
vec3=[vec1 vec0];

axes(handles.axes1);

%    plot(vec2,vec3,'-r')
grid on;
hold on

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %%GRAFICA PARA EL DOWNLINK %%

    a2=calls2+80;
    b2=(a2-calls2)/ague;
    c2=ones(1,b2);
    d2=datrate*calls2;
    vec02=d2*c2;

vec12=datrate:datrate*ague:datrate*calls2;
vec22=1:ague:calls2+80;
vec32=[vec12 vec02];

axes(handles.axes1);

```

```

graph = plot(vec22,vec32,'h-
b',vec2,vec3,'h-r');
grid on;

xlabel('UE');
ylabel('Throughput Mbps');
title('Throughput teórico vs UE
');

legend(graph,'Th DownLink (AMR
23.85)', 'Th UpLink (AMR 23.85)');

return

end

function edit6_Callback(hObject,
eventdata, handles)
function edit6_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function popupmenu16_Callback(hObject,
eventdata, handles)
function popupmenu16_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function popupmenu15_Callback(hObject,
eventdata, handles)
function popupmenu15_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function popupmenu17_Callback(hObject,
eventdata, handles)

cr = [0.1100 0.1400 0.1700 0.2200 0.2800
0.3400 0.4000 0.4700 0.5400 0.6100 0.3000
0.3400 0.3900 0.4400 0.5000 0.5500 0.5900
0.3900 0.4200 0.4600 0.5100 0.5500 0.6000
0.6400 0.6900 0.7400 0.7800 0.8100];

```

```

modindex = get(handles.popupmenu17,
'value');

    if (modindex==1)

set(handles.popupmenu18, 'String', 'Code
Rate');

        elseif (modindex==2)
            m = 2;
            elements =
cr(1:10);

set(handles.popupmenu18, 'String',
elements);

            elseif (modindex==3)
                m = 4;
                elements =
cr(11:17);

set(handles.popupmenu18, 'String',
elements);

            elseif (modindex==4)
                m = 6;
                elements =
cr(18:28);

set(handles.popupmenu18, 'String',
elements);

        end

function popupmenu17_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
if ispc &&
isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function listbox2_Callback(hObject,
eventdata, handles)
function listbox2_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
if ispc &&
isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function popupmenu18_Callback(hObject,
eventdata, handles)

set(handles.popupmenu18, 'String', '');

```

```

cr = [0.1100 0.1400 0.1700 0.2200 0.2800
0.3400 0.4000 0.4700 0.5400 0.6100 0.3000
0.3400 0.3900 0.4400 0.5000 0.5500 0.5900
0.3900 0.4200 0.4600 0.5100 0.5500 0.6000
0.6400 0.6900 0.7400 0.7800 0.8100];

mod_index = get(handles.popupmenu17,
'value');

    if (mod_index==1)

set(handles.popupmenu18, 'String',
'Seleccione un índice de modulación...');

        elseif (mod_index==2)
            m = 2;
            elements =
cr(1:10);

set(handles.popupmenu18, 'String',
elements);

            coderate =
get(handles.popupmenu18, 'value');

            if
(coderate==1)

set(handles.text89, 'String', cr(1));
set(handles.text117, 'String', cr(1));

            elseif
(coderate==2)

set(handles.text89, 'String', cr(2));
set(handles.text117, 'String', cr(2));

            elseif
(coderate==3)

set(handles.text89, 'String', cr(3));
set(handles.text117, 'String', cr(3));

            elseif
(coderate==4)

set(handles.text89, 'String', cr(4));
set(handles.text117, 'String', cr(4));

            elseif
(coderate==5)

set(handles.text89, 'String', cr(5));

```

---

```

set(handles.text117, 'String', cr(5));

                                elseif
(coderate==6)
set(handles.text89, 'String', cr(6));
set(handles.text117, 'String', cr(6));

                                elseif
(coderate==7)
set(handles.text89, 'String', cr(7));
set(handles.text117, 'String', cr(7));

                                elseif
(coderate==8)
set(handles.text89, 'String', cr(8));
set(handles.text117, 'String', cr(8));

                                elseif
(coderate==9)
set(handles.text89, 'String', cr(9));
set(handles.text117, 'String', cr(9));

                                elseif
(coderate==10)
set(handles.text89, 'String', cr(10));
set(handles.text117, 'String', cr(10));

                                end

                                elseif (mod_index==3)
                                    m = 4;
                                    elements =
cr(11:17);
set(handles.popupmenu18, 'String',
elements);

                                    coderate =
get(handles.popupmenu18, 'value');

                                if
(coderate==1)
set(handles.text89, 'String', cr(11));
set(handles.text117, 'String', cr(11));

                                elseif
(coderate==2)
set(handles.text89, 'String', cr(12));

```

```

set(handles.text117, 'String', cr(12));

                                elseif
(coderate==3)
set(handles.text89, 'String', cr(13));
set(handles.text117, 'String', cr(13));

                                elseif
(coderate==4)
set(handles.text89, 'String', cr(14));
set(handles.text117, 'String', cr(14));

                                elseif
(coderate==5)
set(handles.text89, 'String', cr(15));
set(handles.text117, 'String', cr(15));

                                elseif
(coderate==6)
set(handles.text89, 'String', cr(16));
set(handles.text117, 'String', cr(16));

                                elseif
(coderate==7)
set(handles.text89, 'String', cr(17));
set(handles.text117, 'String', cr(17));

                                end

                                elseif (mod_index==4)
                                    m = 6;
                                    elements =
cr(18:28);
set(handles.popupmenu18, 'String',
elements);

                                    coderate =
get(handles.popupmenu18, 'value');

                                if
(coderate==1)
set(handles.text89, 'String', cr(18));
set(handles.text117, 'String', cr(18));

```

---

```

                                elseif
(coderate==2)
set(handles.text89, 'String', cr(19));
set(handles.text117, 'String', cr(19));

                                elseif
(coderate==3)
set(handles.text89, 'String', cr(20));
set(handles.text117, 'String', cr(20));

                                elseif
(coderate==4)
set(handles.text89, 'String', cr(21));
set(handles.text117, 'String', cr(21));

                                elseif
(coderate==5)
set(handles.text89, 'String', cr(22));
set(handles.text117, 'String', cr(22));

                                elseif
(coderate==6)
set(handles.text89, 'String', cr(23));
set(handles.text117, 'String', cr(23));

                                elseif
(coderate==7)
set(handles.text89, 'String', cr(24));
set(handles.text117, 'String', cr(24));

                                elseif
(coderate==8)
set(handles.text89, 'String', cr(25));
set(handles.text117, 'String', cr(25));

                                elseif
(coderate==9)
set(handles.text89, 'String', cr(26));
set(handles.text117, 'String', cr(26));

                                elseif
(coderate==10)
set(handles.text89, 'String', cr(27));
set(handles.text117, 'String', cr(27));

                                elseif
(coderate==11)
set(handles.text89, 'String', cr(28));
set(handles.text117, 'String', cr(28));

                                end

                                function popupmenu18_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

                                function pushbutton14_Callback(hObject,
eventdata, handles)

helpdlg({'DwPTS / GP/ UpPTS' '(Downlink
Pilot Signal / Guard Period / Uplink Pilot
Signal):' '' 'Los valores desplegados para
cada uno de los tres campos de la subtrama
especial están en función de símbolos
OFDM'},...
'Ayuda');

                                function pushbutton15_Callback(hObject,
eventdata, handles)

helpdlg({'DL:UL (Downlink:Uplink):'
'Subtramas dedicadas al enlace descendente
y al enlace ascendente
respectivamente'},...
'Ayuda');

                                function pushbutton17_Callback(hObject,
eventdata, handles)

helpdlg('Time Division Duplex
Configuration Index: El índice determina
el número de subtramas dedicadas al enlace
ascendente y al enlace descendente',...
'Ayuda');

                                function pushbutton16_Callback(hObject,
eventdata, handles)

```

---

```

helpdlg('Special Subframe Configuration
Index: Cada valor representa un tipo de
configuración para el número de símbolos
OFDM que se le asignarán a los campos
DwPTS, GP, y UpPTS',...
    'Ayuda');

function figure1_ResizeFcn(hObject,
eventdata, handles)

function pushbutton18_Callback(hObject,
eventdata, handles)

helpdlg('Indica el número total de
Resource Elements (de canal PDSCH)
disponibles para datos en enlace de
Downlink',...
    'Ayuda');

function pushbutton19_Callback(hObject,
eventdata, handles)

helpdlg('Indica el número total de
Resource Elements (de canal PUSCH)
disponibles para datos en enlace de
Uplink',...
    'Ayuda');

function pushbutton20_Callback(hObject,
eventdata, handles)

helpdlg({'Throughput [bps] en enlace de
Downlink sin uso de bits de redundancia
para la codificación del canal' ''
'Throughput = (REs de PDSCH)*(índice de
modulación)*(100 - Número de tramas
transmitidas en un segundo)' ''
'Throughput=[symbol]*[bits/symbol]*[s] =
[bps]'},...
    'Ayuda');

function pushbutton21_Callback(hObject,
eventdata, handles)
helpdlg({'Throughput [bps] en enlace de
Uplink sin uso de bits de redundancia para
la codificación del canal' '' 'Throughput
= (REs de PUSCH)*(índice de
modulación)*(100 - Número de tramas
transmitidas en un segundo)' ''
'Throughput=[symbol]*[bits/symbol]*[s] =
[bps]'},...
    'Ayuda');

function pushbutton22_Callback(hObject,
eventdata, handles)
helpdlg({'MCS: Modulation and Coding
Scheme.' '' 'm: bits por símbolo usados
para la modulación' '' ' m=2 -->
QPSK' '' ' m=4 --> 16 QAM' '' '
m=6 --> 64 QAM' '' '' 'Code Rate: Es
definido como la tasa de datos a

transmitir que se pueden asignar a una
subtrama en relación a la tasa de datos a
transmitir máxima que puede ser asignada
en la subtrama. Un CR menor indica que se
incluyen más bits de redundancia en el
proceso de codificación del canal,
mientras un CR mayor refiere el uso de
menos bits de redundancia.'},...
    'Ayuda');
function pushbutton23_Callback(hObject,
eventdata, handles)

cla %clear axes

function pushbutton24_Callback(hObject,
eventdata, handles)

helpdlg({'Tasa de transmisión de datos a
nivel de capa 3' '' 'Sólo se consideran 40
Bytes de encabezado' '' '' '12+8+20 Bytes
= RTP+UDP+IP'},...
    'Ayuda');

function pushbutton25_Callback(hObject,
eventdata, handles)

helpdlg({'Tasa de transmisión de datos a
nivel de capa 1' '' 'Se consideran 52
Bytes de encabezado' '' '' '(12+8+20)+(12)
Bytes = (RTP+UDP+IP)+(PDCP,RLC,MAC)'},...
    'Ayuda');

function pushbutton29_Callback(hObject,
eventdata, handles)

helpdlg({'El throughput considerado en
esta sección hace referencia al throughput
de capa física multiplicado por el code
rate elegido'},...
    'Ayuda');
function popupmenu21_Callback(hObject,
eventdata, handles)
BW = get(handles.popupmenu21, 'Value');

        if (BW==1)
            msgbox({'Seleccione un BW
de canal'}, 'Achtung', 'warn');
            PRB = 0;

set(handles.text102, 'String', '');
        elseif (BW==2)

set(handles.text102, 'String', '6');
        elseif (BW==3)

set(handles.text102, 'String', '15');
        elseif (BW==4)

set(handles.text102, 'String', '25');

```

---

```

elseif (BW==5)
set(handles.text102,'String', '50');
elseif (BW==6)
set(handles.text102,'String', '75');
elseif (BW==7)
set(handles.text102,'String', '100');
end

function popupmenu21_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function pushbutton30_Callback(hObject,
eventdata, handles)

helpdlg({'Physical Resource Blocks' ''
'Número de bloques de recursos físicos de
acuerdo al ancho de banda del canal'},...
'Ayuda');

function popupmenu21_KeyPressFcn(hObject,
eventdata, handles)
function pushbutton31_Callback(hObject,
eventdata, handles)

helpdlg({'Para hacer uso completo de
herramientas sobre la gráfica:' '' -
Haga click derecho sobre el cuadro de
acotaciones*' '' - Haga uso del toolbox
ubicado en la parte superior izquierda de
la interfaz' '' '' '' * Para ver el
cuadro completo de acotaciones seleccione
la opción -Refresh-'},...
'Ayuda');
function pushbutton32_Callback(hObject,
eventdata, handles)

helpdlg({'La capacidad de llamadas está en
referencia a las llamadas que se pueden
llevar a cabo en una célula de red' ''
'Considerese el enlace de UL como las
llamadas salientes de la célula (UE hacia
eNodeB)' 'Considerese el enlace de DL como
las llamadas entrantes a la célula (eNodeB
hacia UE)'},...
'Info');
function pushbutton33_Callback(hObject,
eventdata, handles)

helpdlg({'Realiza el cálculo del
throughput en la célula de LTE para
enlaces de DL y UL en referencia a la

```

```

elección de índice de configuración TDD,
índice de configuración de Subtrama
especial, índice de modulación, code rate,
y tipo de codec'},...
'Ayuda');

```

```

function pushbutton34_Callback(hObject,
eventdata, handles)
helpdlg({'Realiza el cálculo de Resource
Elements en el canal para enlaces DL y UL
desplegando en el menú lateral derecho del
apartado de capa física el tipo de
configuración elegida de acuerdo a la
elección de índices de configuración TDD y
SS e índice de modulación'},...
'Ayuda');

```

```

function pushbutton35_Callback(hObject,
eventdata, handles)

```

```

[s,v] = listdlg('PromptString','Seleccione
un modelo de propagación:',...
'SelectionMode','single',...
'ListString',{'LTE Modelo
vehicular','Clase WiMAX Cat A B C
LTE'},...
'ListSize',[200 300]);

```

```

if (v==1)

```

```

if (s==1)

```

```

Do = 100; % [m]
ht = 1.5; % [m]

altura terminal
hr = 25; % [m] altura
radiobase
f_c = 1700090000;
% [Hz]
lambda = 0.176461246;
A = 77.05121043;

% [dB] =
20*LOG10((4*3.14159264945*Do/lamda))
Cf = -0.423348497;
% [dB] = 6*LOG10(f_c/2000000000)
Ch_a = 1.336844482;
% [dB]
Ch_b = 1.336844482;
% [dB]
Ch_c = 2.498774732;
% [dB]

n_a = 4.615 ;
n_b = 4.1675 ;
n_c = 3.9 ;
s_a = 10.6; % [dB]
s_b = 9.6; % [dB]
s_c = 8.2; % [dB]
eNB_Nf = 2.3; % dB
ue_Nf = 4; % dB
BW = 180000; % Hz

```

---

```

119.1276523; %dBm      N_eNB = -
                        N_ue = -117.4276523;
%dBm                  Backoff = 0; %dB
                        eNB_G = 18; %dBi
                        Ptx_eNB = 26.9897;
%dBm                  EIRP_eNB = 44.9897;
%dBm                  ue_G = -1; %dBi
                        Ptx_Ue = 23.01029996;
%dBm                  EIRP_ue = 22.01029996;
%dBm                  s = 0; %dB

                        allparameters =
[Do;ht;hr;f_c;lambda;A;Cf;eNB_Nf;ue_Nf;BW;
N_eNB;N_ue;Backoff;eNB_G;ue_G;Ptx_eNB;Ptx_
Ue;EIRP_ue;EIRP_eNB;s];

                        set(handles.uitable3,
'data', allparameters);

                        set(handles.text114,
'string','LTE Modelo vehicular');

%
get(handles.text114,'LTE Modelo
vehicular');

                        elseif(s==2)

                                Do = 100;    % [m]
                                ht= 1.5;    % [m]
                                hr= 40;    % [m]
                                f_c = 2111350000;
% [Hz]
                                lambda = 0.142089185;
                                A = 78.93297682;
% [dB]
                                Cf = 0.141181421;
% [dB]
                                Ch_a = 1.336844482;
% [dB]
                                Ch_b = 1.336844482;
% [dB]
                                Ch_c = 2.498774732;
% [dB]
                                n_a = 4.615 ;
                                n_b = 4.1675 ;
                                n_c = 3.9 ;
                                s_a = 10.6; % [dB]
                                s_b = 9.6; % [dB]
                                s_c = 8.2; % [dB]

                                eNB_Nf = 4; %dB
                                ue_Nf = 4; %dB
                                BW = 2699999; %Hz

147.4276523; %dBm      N_eNB = -
                        N_ue = -105.6667413;
%dBm                  Backoff = 0; %dB
                        eNB_G = 15; %dBi
                        Ptx_eNB = 26.9897;
%dBm                  EIRP_eNB = 41.9897;
%dBm                  ue_G = -1; %dBi
                        Ptx_Ue = 26.98970004;
%dBm                  EIRP_ue = 25.98970004;
%dBm                  s = 10; %dB

                        allparameters =
[Do;ht;hr;f_c;lambda;A;Cf;eNB_Nf;ue_Nf;BW;
N_eNB;N_ue;Backoff;eNB_G;ue_G;Ptx_eNB;Ptx_
Ue;EIRP_ue;EIRP_eNB;s];

                        set(handles.uitable3,
'data', allparameters);

                        set(handles.text114,
'string','Clase WiMAX CatA,B,C LTE');

%
get(handles.text114,'Clase WiMAX
CatA,B,C LTE');

                        elseif(s==3)

                                elseif(s==4)

                                        end

                                        elseif (v==0)

                                                msgbox({'Selección no válida'
'' 'Seleccione un modelo de propagación
para la obtención de parámetros y gráficas
correspondientes'}, 'Warning','warn');

                                                end

                                % --- Executes on button press in
                                pushbutton36.
                                function pushbutton36_Callback(hObject,
                                eventdata, handles)

                                        SNR = [53.46096225

```

---

---

42.62388241	-32.73929826
36.28459708	-33.35734716
31.78680256	-33.95189033
25.44751724	-34.5246504
20.94972272	-35.07716731
17.46096225	-35.61082326
14.61043739	-36.12686354
12.20035297	-36.62641407
10.11264288	-37.11049612
8.271152068	-37.58003896
6.623882408	-38.03589053
5.133745742	-38.47882671
3.77335755	-38.90955922
2.521921725	-39.32874254
1.363273123	-39.73697987
0.284597082	-40.13482834
-0.724436968	-40.52280362
-1.672278762	-40.90138389
-2.565927776	-41.27101343
-3.411247227	-41.63210573
-4.213197436	-41.98504625
-4.976012203	-42.33019496
-5.703334102	-42.66788846
-6.398319689	-42.99844203
-7.063722294	-43.32215134
-7.701957905	-43.63929409];
-8.315158119	
-8.905213102	d = [100
-9.473806721	200
-10.02244552	300
-10.55248276	400
-11.06513857	600
-11.56151681	800
-12.04261943	1000
-12.50935861	1200
-12.96256719	1400
-13.40300762	1600
-13.83137966	1800
-14.24832707	2000
-14.65444345	2200
-15.05027728	2400
-15.43633643	2600
-15.81309205	2800
-16.18098199	3000
-16.54041395	3200
-16.89176809	3400
-17.23539953	3600
-17.57164048	3800
-17.90080214	4000
-18.22317647	4200
-19.74229295	4400
-21.12679001	4600
-22.39859666	4800
-23.57468486	5000
-24.6684595	5200
-25.69069288	5400
-26.65017189	5600
-27.55415783	5800
-28.40872032	6000
-29.2189846	6200
-29.98931781	6400
-30.72347152	6600
-31.42469224	6800
-32.0958082	7000

```

7200
7400
7600
7800
8000
8200
8400
8600
8800
9000
9200
9400
9600
9800
10800
11800
12800
13800
14800
15800
16800
17800
18800
19800
20800
21800
22800
23800
24800
25800
26800
27800
28800
29800
30800
31800
32800
33800
34800
35800
36800
37800
38800
39800
40800
41800
42800
43800
44800
45800
46800
47800
48800
49800];

                                grid on;

                                pause(0.00001);
                                frame_h = get(handle(gcf), 'JavaFrame');
                                set(frame_h, 'Maximized', 1);

                                % --- Executes on button press in
                                pushbutton37.
                                function pushbutton37_Callback(hObject,
                                eventdata, handles)

                                %Distancia radial

                                % axes (handles.axes4);
                                figure

                                t=0:0.001:1;
                                s15=15*sin(2*pi*t);
                                c15=15*cos(2*pi*t);
                                s14=14*sin(2*pi*t);
                                c14=14*cos(2*pi*t);
                                s13=13*sin(2*pi*t);
                                c13=13*cos(2*pi*t);
                                s12=12*sin(2*pi*t);
                                c12=12*cos(2*pi*t);
                                s11=11*sin(2*pi*t);
                                c11=11*cos(2*pi*t);
                                s10=10*sin(2*pi*t);
                                c10=10*cos(2*pi*t);
                                s9=9*sin(2*pi*t);
                                c9=9*cos(2*pi*t);
                                s8=8*sin(2*pi*t);
                                c8=8*cos(2*pi*t);
                                s7=7*sin(2*pi*t);
                                c7=7*cos(2*pi*t);
                                s6=6*sin(2*pi*t);
                                c6=6*cos(2*pi*t);
                                s5=5*sin(2*pi*t); %Sine
                                wave with amplitude=3unit

                                c5=5*cos(2*pi*t); %Cosine wave with
                                amplitude=3unit

                                s4=4*sin(2*pi*t);
                                c4=4*cos(2*pi*t);
                                s3=3*sin(2*pi*t);
                                c3=3*cos(2*pi*t);
                                s2=2*sin(2*pi*t);
                                c2=2*cos(2*pi*t);
                                s1=1*sin(2*pi*t);
                                c1=1*cos(2*pi*t);

                                propagation =
                                plot(s1,c1,'-y',s2,c2,'-y',s3,c3,'-
                                y',s4,c4,'-y',s5,c5,'-y',s6,c6,'-
                                g',s7,c7,'-g',s8,c8,'-g',s9,c9,'-
                                b',s10,c10,'-b',s11,c11,'-b',s12,c12,'-
                                b',s13,c13,'-b',s14,c14,'-b',s15,c15,'-
                                b'); %Plotting sin Vs Cos

                                figure

                                plot(d',SNR','-', 'Color', [0 0 1]);

                                xlabel('Distancia [m]');
                                ylabel('SNR [dB]');
                                title('Signal to Noise Ratio vs
                                Distancia');

                                title('Distancia
                                Radial');

                                % legend(SNRvsd, 'SNR');

```

```

                                legend(propagation, 'CR
= 0.81 - SNR = 22.8 [dB]', 'CR = 0.78 - SNR
= 21.3 [dB]', 'CR = 0.64 - SNR = 19.2
[dB]', 'CR = 0.55 - SNR = 17.4 [dB]', 'CR =
0.42 - SNR = 16.2 [dB]', 'CR = 0.59 - SNR =
13.6 [dB]', 'CR = 0.44 - SNR = 11.9
[dB]', 'CR = 0.39 - SNR = 10 [dB]', 'CR =
0.61 - SNR = 8.2 [dB]', 'CR = 0.47 - SNR =
6.8 [dB]', 'CR = 0.34 - SNR = 5 [dB]', 'CR =
0.22 - SNR = 4.4 [dB]', 'CR = 0.14 - SNR =
3.2 [dB]', 'CR = 0.11 - SNR = 3 [dB]', 'CR =
0.11 - SNR = 3 [dB]');

                                axis equal;
axis off

pause(0.00001);
frame_h = get(handle(gcf), 'JavaFrame');
set(frame_h, 'Maximized', 1);

function pushbutton38_Callback(hObject,
eventdata, handles)

PrxLoss = [-33.06151039
-39.0821103
-42.60393548
-45.10271021
-48.6245354
-51.12331013
-53.06151039
-54.64513531
-55.9840711
-57.14391004
-58.16696049
-59.0821103
-59.909964
-60.66573522
-61.36097735
-62.00467101
-62.60393548
-63.16450995
-63.69108873
-64.1875604
-64.65718232
-65.10271021
-65.5264962
-65.93056392
-66.31666702
-66.68633514
-67.04091047
-67.38157726
-67.70938558
-68.02527093
-68.33007026
-68.6245354
-68.90934418
-69.18510987
-69.4523891
-69.71168864
-69.96347119
-70.20816032
-70.44614478

                                -70.67778223
                                -70.90340244
                                -71.12331013
                                -71.33778744
                                -71.54709611
                                -71.75147941
                                -71.95116383
                                -72.14636058
                                -72.33726693
                                -72.52406746
                                -72.70693505
                                -72.8860319
                                -73.7299855
                                -74.49915053
                                -75.20570978
                                -75.85909212
                                -76.4667447
                                -77.03465213
                                -77.56769602
                                -78.06991043
                                -78.54466737
                                -78.99481419
                                -79.42277709
                                -79.83064026
                                -80.22020733
                                -80.59304953
                                -80.950544
                                -81.29390451
                                -81.62420627
                                -81.94240631
                                -82.24936014
                                -82.54583567
                                -82.83252472
                                -83.11005279
                                -83.37898726
                                -83.63984439
                                -83.89309527
                                -84.13917092
                                -84.37846676
                                -84.61134638
                                -84.8381449
                                -85.05917183
                                -85.27471365
                                -85.48503602
                                -85.69038577
                                -85.8909926
                                -86.08707067
                                -86.27881995
                                -86.46642745
                                -86.65006832
                                -86.82990683
                                -87.00609724];

                                d = [100
                                200
                                300
                                400
                                600
                                800
                                1000
                                1200
                                1400
                                1600

```

---

```

1800
2000
2200
2400
2600
2800
3000
3200
3400
3600
3800
4000
4200
4400
4600
4800
5000
5200
5400
5600
5800
6000
6200
6400
6600
6800
7000
7200
7400
7600
7800
8000
8200
8400
8600
8800
9000
9200
9400
9600
9800
10800
11800
12800
13800
14800
15800
16800
17800
18800
19800
20800
21800
22800
23800
24800
25800
26800
27800
28800
29800
30800
31800
32800

33800
34800
35800
36800
37800
38800
39800
40800
41800
42800
43800
44800
45800
46800
47800
48800
49800];

figure

    plot(d',PrxLoss','-','Color',[0
0.5 0]);

    xlabel('Distancia [m]');
    ylabel('Prx Loss [dBm]');
    title('Pérdida de potencia vs
Distancia');
    % legend(SNRvsd, 'SNR');
    grid on;

pause(0.00001);
frame_h = get(handle(gcf),'JavaFrame');
set(frame_h,'Maximized',1);

function pushbutton44_Callback(hObject,
eventdata, handles)
x = inputdlg({'Free Space Loss (Lf)'
'Frecuencia central (fc)' 'Distancia (d)'
'Altura a la que se encuentra la antena de
UE(ht)' 'Altura de antena eNB (hr)'},...
'Introduzca los valores
solicitados', [1 70]);

Do = x{3};
lambda = (300000000/(x{2})); %lambda =
c/fc

Amu =
20*log10((4*3.14159264945*Do/lambda));

allparameters = [x;Amu];

set(handles.uitable3, 'data',
allparameters);

function pushbutton45_Callback(hObject,
eventdata, handles)

```

