



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

LTE- Advanced: La Evolución de las Comunicaciones Móviles

**TRABAJO MONOGRÁFICO
PARA OBTENER EL GRADO DE
Ingeniero en Redes**

PRESENTA
Br. Clarissa del Rocio Ramos Mis

SUPERVISORES
Dr. Homero Toral Cruz

Dr. Freddy Ignacio Chan Puc

Ing. José Luis Vázquez Ávila

 UNIVERSIDAD DE
QUINTANA ROO
SERVICIOS ESCOLARES
TITULACIONES



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, DICIEMBRE DE 2017

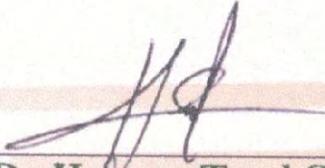


UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**TRABAJO MONOGRÁFICO ELABORADO BAJO SUPERVISIÓN DEL
COMITÉ DE ASESORÍA Y APROBADO COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO EN REDES**

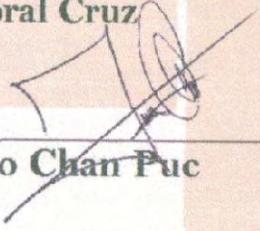
Comité de Trabajo Monográfico

SUPERVISOR:



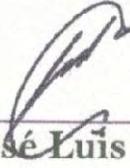
Dr. Homero Toral Cruz

SUPERVISOR:

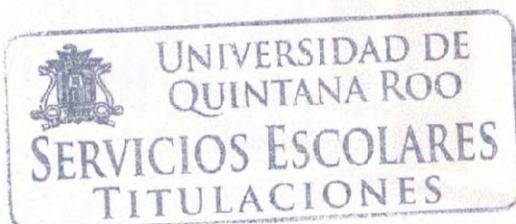


Dr. Freddy Ignacio Chan Puc

SUPERVISOR:



Ing. José Luis Vázquez Ávila



DEDICATORIAS

La vida se encuentra plagada de retos y uno de ellos es la universidad. Tras verme dentro de ella, me he dado cuenta que más allá de ser un reto, es una base no solo para mi entendimiento del campo en el que me he visto inmerso, sino para lo que me concierne en la vida y mi futuro.

Le agradezco a mi institución y a mis maestros por sus esfuerzos para que finalmente pudiera graduarme como una feliz profesional.

Le agradezco a DIOS por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

A mis PADRES a quienes les debo la persona que soy ahora, por apoyarme en todo momento, por haber creído en mí, muchos de los logros se los debo a ustedes entre los que se incluye éste, por los valores que me han inculcado, por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el trascurso de mi vida y sobre todo por ser un ejemplo para mí.

A mi HERMANA Maritza por todo el apoyo incondicional que me brindaste, por la motivación para la carrera, por tus consejos, por animarme con cada locura que se nos ocurría para darnos ánimos para continuar.

A mi HERMANO Jorge por el apoyo incondicional, por darme fuerzas en los momentos en los que más lo necesitaba para poder ser un buen ejemplo para ti, por llenar mi vida de alegría y risas y porque junto con Maritza me representan la unidad familiar.

A mi ASESOR el Dr. Homero Toral Cruz, durante la realización del proyecto, usted ha sido mi mano derecha y quien me ha guiado en el complicado proceso. Es cierto que no ha sido fácil, sin embargo gracias a su ayuda, esto ha parecido un tanto menos complicado, agradezco igual por el gran apoyo que me ofreció no solo como maestro, asesor y tutor sino como amigo, por creer en mí, por demostrarme siempre que todo es posible gracias al esfuerzo y por las enseñanzas.

A mis COMPAÑEROS y amigos por todos los momentos que pasamos juntos, por el apoyo recibido y por haber hecho de mi etapa universitaria un trayecto de vivencias que nunca olvidaré.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a mis padres que me dieron la vida, que me han apoyado en cada momento de mi vida, que en ningún momento han dejado de creer en mí, por darme una de las mejores herencias para un hijo, el estudio. Por ser mi razón de superación y motivación.

Familia y personas especiales en mi vida, no son nada más y nada menos que un solo conjunto: seres queridos que suponen benefactores de importancia inimaginable en mis circunstancias de humano. No podría sentirme más amena con la confianza que depositan en mí, especialmente cuando he contado con su mejor apoyo a lo largo de mi vida. Quisiera dedicar este proyecto a ustedes, personas de bien, seres que ofrecen amor y bienestar.

A mis hermanos por estar siempre conmigo, por apoyarme, por todas las risas, alegrías y locuras que solo nosotros podemos entender.

A mis compañeros y amigos por acompañarme a lo largo de la carrera y por los momentos que compartimos juntos.

A mi asesor el Dr. Homero Toral Cruz por creer en mí en todo momento, por sus consejos, por la motivación y la ayuda brindada.

RESUMEN

Los sistemas de comunicaciones móviles se introdujeron por primera vez a principios de los años ochenta. Los sistemas de primera generación usaban técnicas de comunicación analógica. En estos sistemas, las células individuales eran grandes y los sistemas no usaban el espectro de radio disponible de manera eficiente, por lo que su capacidad era muy limitada de acuerdo a los estándares actuales. Los dispositivos móviles eran grandes y caros y se comercializaban casi exclusivamente entre los usuarios de negocios.

Posteriormente, con la introducción de GSM (Global System for Mobile Communications) a principios de los años noventa; los sistemas de comunicaciones móviles evolucionaron en gran medida, al utilizar la tecnología digital, lo que permitió un uso más eficiente del espectro de radio y la introducción de dispositivos más pequeños y más baratos. Originalmente fueron diseñados solo para voz, pero luego fueron mejorados para soportar la mensajería instantánea a través del servicio de mensajes cortos (SMS).

Consecutivamente, UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) fue desarrollado a partir de GSM al cambiar por completo la tecnología utilizada en la interfaz aérea, manteniendo la red central casi sin cambios. El sistema fue mejorado posteriormente para aplicaciones de datos, al introducir las tecnologías HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) y HSUPA (High Speed Uplink Packet Access), que se conocen colectivamente como HSPA (High Speed Packet Access).

En 2004, 3GPP comenzó un estudio sobre la evolución a largo plazo de UMTS. El objetivo fue mantener los sistemas de comunicación móvil competitivos en escalas de tiempo de 10 años y más, al ofrecer altas velocidades de datos y bajos retardos para satisfacer los requerimientos de los usuarios finales. En la nueva arquitectura propuesta, EPC (Evolved Packet Core) es un reemplazo directo del sistema de conmutación de paquetes de UMTS y GSM; en esta arquitectura, no existe un sistema equivalente al de conmutación de circuitos, por ejemplo, los servicios de voz se realizan utilizando la tecnología de voz sobre IP (VoIP). Motivado por la creciente demanda de nuevos servicios móviles de banda

ancha con mayores velocidades de datos y calidad de servicio (QoS), 3GPP comenzó a trabajar en dos proyectos paralelos, SAE (System Architecture Evolution) que cubre la red central y LTE (Long Term Evolution), que abarcaba la red de acceso radio. Oficialmente, todo el sistema se conoce como EPS (Evolved Packet System), mientras que el acrónimo LTE se refiere solo a la evolución de la interfaz aérea. A pesar de este uso oficial, LTE se ha convertido en un nombre coloquial para todo el sistema.

Antes de que 3GPP comenzara a trabajar en la tecnología inalámbrica real de cuarta generación, se introdujeron cambios menores en LTE. En particular, las femtoceldas y la conformación de haces de doble capa, predecesoras de las futuras tecnologías LTE-Advanced, se han agregado al estándar. La definición formal del proyecto inalámbrico de cuarta generación, conocido como IMT-Advanced (International Mobile Telecommunications Advanced), fue finalmente publicado por el ITU-R en julio de 2008.

La presente monografía proporciona una visión general sobre la evolución de las comunicaciones móviles, sitúa a LTE-Advanced en su contexto histórico, presenta sus principales requisitos y características técnicas claves.

Palabras clave: LTE, GSM, SAE, redes móviles, espectro, bandas de frecuencia, 3PPP

RESUMEN	5
Índice de Ilustraciones.....	10
Índice de Tablas	11
ÍNDICE DE ABREVIACIONES	12
Capítulo 1: INTRODUCCIÓN	16
1.1 Antecedentes.....	17
1.1.1 Primera Generación (1G).....	18
1.1.2 Segunda Generación (2G) o GSM.....	19
1.1.3 Generación 2.5 (2.5G)	22
1.1.4 Tercera Generación (3G).....	22
1.1.5 Generación 3.5G (3.5G) o HSPA+.....	24
1.1.6 Cuarta Generación (4G)	25
1.2 Redes inalámbricas	26
1.2.1 LTE	27
1.3 Objetivos de LTE.....	29
1.4 Mecanismos de Servicio de Voz.....	30
1.5 3GPP	31
1.5.1 Evolución de la arquitectura en 3GPP	32
Capítulo 2: CONCEPTOS BÁSICOS DE COMUNICACIONES MÓVILES.....	34
2.1 Capacidad del canal inalámbrico.....	34
2.2 Descripción de un sistema celular.....	34
2.3 Modos FDD y TDD.....	35
2.3.1 Frequency Division Duplexing (FDD).....	35
2.3.2 Time Division Duplexing (TDD).....	35
2.4 Desvanecimientos por multitrayectoria	36
2.5 Interferencia inter-símbolo	37
2.6 Reutilización de frecuencias	38
2.7 Tipos de Modulación	39
2.8 Tecnologías de acceso múltiple	40
2.9 Técnicas de duplexado.....	40
2.10 Evolución de las comunicaciones móviles.....	41

2.11 Redes de banda ancha	43
2.12 Arquitectura general de sistemas celulares	44
2.12.1 Equipo de usuario	44
2.12.2 Red de Acceso.....	45
2.12.3 Red Troncal	46
CAPÍTULO 3: ARQUITECTURA GENERAL DEL SISTEMA LTE	47
3.1 Descripción de la arquitectura del sistema	47
3.2 Arquitectura del Sistema Evolucionado (SAE).....	53
3.2.1 SAE Gateway	54
3.2.2 Servicios	56
3.3 El Núcleo de Red SAE: Evolved Packet Core.....	57
3.3.1 Interfaz de Red Troncal EPC	59
3.3.2 Bearers usados por la red LTE	59
3.3.3 Tipo de EPS Bearer	60
3.3.4 Interfaz LTE Uu.....	61
3.3.5 Latencia de la interfaz aire.....	63
3.4 Interfaces	64
3.5 Técnicas de acceso al medio.....	69
3.6 Funcionamiento de descarga y subida de datos	69
CAPÍTULO 4: SISTEMAS DE TRANSMISIÓN.....	71
4.1 OFDM.	71
4.2 OFDMA	74
4.3 SC-FDMA	76
4.4 MIMO	77
CAPÍTULO 5: PROGRAMACIÓN DEL CANAL Y ADAPTACIÓN DE LA VELOCIDAD DE DATOS.....	80
5.1 Programación del enlace descendente.....	81
5.2 Canales físicos de tráfico.....	82
5.3 Canales físicos de control.....	82
5.4 Canales de transporte de enlace descendente	83
5.6 Programación del enlace ascendente	83

5.7 Canales de control	84
5.8 Señales de Referencia (SR) en el enlace ascendente	85
5.9 Canales de transporte de enlace ascendente	85
5.10 Interferencia Inter-Celda	85
5.11 Esquema de Retransmisiones Selectivas	86
5.12 Soporte Multicast y Broadcast	87
5.13 Flexibilidad del Espectro	88
5.14 Flexibilidad en el Sistema dúplex	88
5.15 Flexibilidad en la Frecuencia de banda de operación	89
5.16 Flexibilidad del Ancho de banda	89
5.17 Esquemas de Modulación	90
5.18 Modulación y codificación en LTE	91
5.19 AMC	92
5.20 Estructura de trama	93
CAPÍTULO 6: EL SERVICIO DE SCHEDULING EN LTE	96
6.1 Movilidad	99
6.2 ARQ	100
6.3 Seguridad	100
6.4 QoS, Calidad de Servicio	101
6.5 Soporte QoS y VoIP	102
6.6 Servicios y Aplicaciones	103
CAPÍTULO 7: LTE-AVANZADA	105
7.1 LTE vs WiMAX	105
7.2 Ventajas y Desventajas de LTE	107
Conclusiones	110
REFERENCIAS	111

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Expectativas de migración en la telefonía móvil por parte de las operadoras hacia LTE.	26
Ilustración 2: Modos FDD y TDD.	36
Ilustración 3: Efecto multitrayectoria.	37
Ilustración 4: Interferencia inter-símbolo.	38
Ilustración 5: Multipath.	38
Ilustración 6: Arquitectura general de una red de telefonía celular.	44
Ilustración 7: Arquitectura de Equipo de Usuario.	45
Ilustración 8: Arquitectura de red 3GPP LTE Release 8.	48
Ilustración 9: E-UTRAN	51
Ilustración 10: Arquitectura de red LTE.	52
Ilustración 11: Arquitectura 3G.	53
Ilustración 12: Estrategia de despliegue HSPA y LTE.	54
Ilustración 13: Descripción simplificada del Core Network SAE de LTE.	58
Ilustración 14: Bearers usados por LTE.	59
Ilustración 15: Capa Enlace.	62
Ilustración 16: Interfaz S1-X2.	65
Ilustración 17: Interfaz S1.	68
Ilustración 18: Constelaciones de modulación en LTE.	90
Ilustración 19: Estructura de trama tipo 1.	94
Ilustración 20: Estructura de trama tipo 2.	94

Índice de Tablas

Tabla 1: Evolución de Telefonía Celular	42
Tabla 2: Campos del QCI para QoS en LTE.	61
Tabla 3: Índices de CQI.....	91
Tabla 4: Categorías de equipos de usuario.	93
Tabla 5: Comparativa LTE – WiMax.	106

ÍNDICE DE ABREVIACIONES

3GPP	Third Generation Partnership Project.
AAA	Authentication, Authorization, Accounting
ACK	Acknowledged
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AMC	Adaptive Modulation and Coding
AMPS	Advanced Mobile Phone System
ARP	Allocation and Retention Priority
ARPU	Average Revenue Per User
ARQ	Automatic Repeat Request
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BCH	Broadcast Channel
BTS	Base Transceiver Station
CDMA	Code Division Multiple Access
CDMA2000	Code Division Multiple Access 200
CFI	Channel Format Indicator
CN	Core Network
CQI	Channel Quality Identifier
CS	Circuit Switching
D-AMPS	Digital-Advanced Mobile Phone System
DCI	Downlink Control Information
DHCP	Dinamice Host Configuración Protocol
DL	Downlink
DL-SCH	Downlink Shared Channel
DM-RS	Demodulation Reference Signals
DwPTS	Downlink Pilot Signal
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
Enb	Evolved NodeB
eNode B	evolved Node B; E-UTRAN Node B.
EPC	Evolved Packet Core.
ePDG	evolved Packet Data Gateway.
EPS	Evolved Packet System
E-RAB	E-UTRAN Radio Access Bearer
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
FDD	Frecuency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FTP	File Transfer Protocol

GBR	Guaranteed Bit Rate
GERAN	GSM EDGE Radio Access Network
GGSN	Gateway GPRS Support Node.
GP	Guard Period
GPRS	General Packet Radio Services
GSM	Global System for Mobile communication
GTP	GPRS Tunneling Protocol.
HARQ	Hybrid Automatic Repeat-reQuest
HD	High Definition
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMT-2000	International Mobile Telecommunications 2000
IP	Internet Protocol
IPTV	Internet Protocol Television
ISI	Inter Symbol Interference
Kbps	Kilobits per second
LOS	Line Of Sight
LTE	Long Term Evolution
MAC	Media Access Control
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service
MBSFN	Multicast-Broadcast Single-Frequency Network
MCH	Multicast Channel
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
MSC	Mobile Switching Center
NACK	Negative Acknowledgment
Non GBR	Non-Guaranteed Bit Rate
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access.
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
PCRF	Policing and Charging Rules Function
PDC	Personal Digital Cellular
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCCP	Packet Data Convergence Protocol
PDN	Packet Data Network.
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
P-GW	Packet data network Gate Way

PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel
PMCH	Physical Multicast Channel
PMIP	Proxy Mobile Internet Protocol.
PRACH	Physical Random Access Channel
PRB	Physical Resource Block
P-SCH	Primary SCH
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RACH	Random Access Channel
RADIUS	Remote Authentication Dial-In User Server
RAN	Radio Access Network
RE	Resource Element
RLC	Radio Link Control
RNC	Radio Network Controller.
RNL	Radio Network Layer
RRC	Radio Resource Control
RRM	Radio Resource Management
RS	Reference Signal
RX	Receive
SAE	System Architecture Evolution
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
S-CH	Synchronization Channel
SCTP	Stream Control Transmission Protocol
SGSN	Serving GPRS Support Node
S-GW	Service Gate Way
SIM	Subscriber Identity Module
SMS	Short Message Service
SN	Sequence Number
SNR	Signal to Noise Ratio
SRS	Sounding Reference Signals
S-SCH	Secondary Synchronization Channel
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TF	Transport Format
TNL	Transport Network Layer
TX	Transmit
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UICC	Universal Integrated Circuit Card
UIT	Union International of Telecommunications

UL	Uplink
UL-SCH	Uplink Shared Channel
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UpPTS	Uplink Pilot Signal
USIM	Universal Subscriber Identity Module
UTRA	Universal Terrestrial Radio Access
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network
VoIP	Voice over Ip
VoLGA	Voice over LTE via General Access
VoLTE	Voice over LTE
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
Wi-Fi	Wireless Fidelity (IEE 802.11)
WiMAX	Worldwide Interoperability Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WRC07	World Radiocommunication Conference 2007

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicaciones móviles se introdujeron por primera vez a principios de los años ochenta. Los sistemas de primera generación usaban técnicas de comunicación analógica. Posteriormente, con la introducción de GSM; los sistemas de comunicaciones móviles evolucionaron en gran medida, al utilizar la tecnología digital. Consecutivamente, UMTS fue desarrollado a partir de GSM al cambiar por completo la tecnología utilizada en la interfaz aérea, manteniendo la red central casi sin cambios. En 2004, 3GPP comenzó un estudio sobre la evolución a largo plazo de UMTS. En la nueva arquitectura propuesta, EPC es un reemplazo directo del sistema de conmutación de paquetes de UMTS y GSM. [1, 2]

Motivado por la creciente demanda de nuevos servicios móviles de banda ancha con mayores velocidades de datos y QoS, 3GPP comenzó a trabajar en dos proyectos paralelos, SAE que cubre la red central y LTE, que abarcaba la red de acceso radio.

LTE basa su funcionamiento en la conmutación de paquetes, por lo que la transmisión de información entre los elementos de la red se realiza sobre el protocolo de internet (IP), en consecuencia, los servicios de voz se realizan sobre una tecnología que pueda hacer uso de redes de paquetes. Por tanto, la voz necesita ser digitalizada para su posterior envío, este proceso se lleva a cabo mediante varios y distintos tipos de codificadores de voz. [3]

Los recursos que dispone una red LTE, varían en función del ancho de banda del que se pueda hacer uso y del modo de multiplexación empleado, que puede ser TDD (Time Division Duplex) o FDD (Frequency División Duplex), así como de la modulación y la tasa de codificación. Esto hace muy dinámicas a las redes LTE.

A nivel global existe un creciente requerimiento de servicios de banda ancha móvil, originados por la alta penetración de redes celulares, y la creciente demanda de acceso a datos, contenido multimedia y servicios. Las redes tradicionales 2G y 3G se han visto sobrepasadas en su capacidad, sin lograr atender esta demanda, sufriendo de congestiones, con impacto en la calidad de

servicio al usuario. La tecnología LTE, surge como respuesta a estas necesidades, presentando una arquitectura de comunicación diseñada para brindar un acceso de banda ancha a través de una red móvil. [4]

Las redes móviles han cambiado a lo largo de los años y nos han brindado distintos servicios. A continuación viajaremos por la evolución de estas tecnologías, en donde podremos apreciar los avances y cambios que se han hecho respecto a la época, lo que a su vez nos permitirá entender y apreciar la velocidad con la que avanza la tecnología para satisfacer nuestras necesidades. [2]

El crecimiento exponencial en el número de usuarios de telefonía móvil, unido al estado tecnológico actual hace pensar en una fuerte demanda de aplicaciones móviles de banda ancha, entre las que podríamos destacar la navegación por Internet de alta velocidad; el envío y recepción de e-mail; la televisión en el móvil; la descarga rápida de contenidos multimedia o los juegos interactivos. Satisfacer dicha demanda, consiguiendo que los servicios ofertados resulten atractivos para el usuario al mismo tiempo que los operadores puedan reducir sustancialmente los gastos de operación, requiere continuar avanzando en el desarrollo de las redes móviles actuales. [1]

En el presente documento se presenta una visión general sobre la evolución de las comunicaciones móviles, situando a la tecnología LTE-Advanced en su contexto histórico. El desarrollo de este trabajo está enfocado a mostrar las características técnicas más importantes de esta tecnología, considerando sus principales ventajas y desventajas. Procura mostrar al lector una síntesis de la arquitectura, características y otros métodos utilizados por las redes LTE para la entrega de servicios, los beneficios que presenta frente a las tecnologías anteriores, la oferta y demanda por parte de las operadoras y los usuarios, las tasas de consumo que han impulsado su desarrollo.

1.1 Antecedentes

La necesidad del hombre de comunicarse a mayores distancias lo ha llevado a desarrollar diversos sistemas como el telégrafo o el teléfono. Estos

sistemas han sido impulsados por los estudios de la electricidad, e inicialmente funcionaban únicamente mediante cables, conectados unos a otros. Sin embargo, como parte de la evolución de los sistemas de comunicación, surgió la necesidad de eliminar dichos cables; lo cual, conllevó a la utilización de ondas de radio para la primera transmisión telegráfica inalámbrica en el año 1901. El ancho de banda de estos sistemas era muy limitado, por tal motivo, las transmisiones de información eran muy lentas.

Desde entonces, los avances tecnológicos se dieron de una manera mucho más rápida. Las posibilidades de comunicación se extendieron con la aparición de computadoras, satélites y posteriormente las redes de computadoras, que marcaron el origen del Internet.

Entre los años 1940 y 1950 apareció el primer sistema que ofrecía servicio de telefonía móvil, el radioteléfono. Este sistema era severamente limitado por su poca movilidad, escasa capacidad, mal servicio y baja calidad de voz, además los equipos eran grandes, pesados, caros y susceptibles a interferencias. [5]

Por otro lado, el número de usuarios de las redes de telefonía móvil ha experimentado un crecimiento desmedido durante los últimos 10 años. En promedio, más de un millón de usuarios ingresan cada día a disponer del servicio de voz alrededor del mundo.

La razón de este crecimiento es que los teléfonos móviles presentan bajos costos, alta eficiencia y alta capacidad, además de los beneficios que se obtienen al estar conectados por las redes móviles.

A continuación se presenta una visión general sobre la evolución de las comunicaciones móviles desde la Primera Generación (1G) a la Cuarta Generación (4G).

1.1.1 Primera Generación (1G)

Durante la década de los años 70s, aparecieron a nivel comercial las comunicaciones móviles con su primera generación. Estas redes, conocidas como sistemas celulares, fueron un salto cualitativo en términos de capacidad y

movilidad. Los equipos fueron más pequeños y livianos, pero siguieron transmitiendo únicamente información analógica de voz. [2]

Los móviles de primera generación funcionaban de manera analógica, es decir que la transmisión y recepción de datos se apoyaba sobre un conjunto de ondas de radio que cambiaban de modo continuo.

El hecho de que fueran analógicos traía consigo una serie de inconvenientes, tales como que solo podían ser utilizados para la transmisión de voz (el uso de mensajería instantánea era algo solo visible en un futuro “muy lejano”) o su baja seguridad, lo cual permitía que una persona escuchara llamadas ajenas con un simple sintonizador de radio o, incluso hacer uso de las frecuencias cargando el importe de las llamadas a otras personas. [4]

Como suele ocurrir con tecnologías nuevas, en un principio no existía estándar alguno, por lo que la tecnología 1G solía funcionar únicamente en el país en que se había desarrollado al ser incompatible con las redes del resto de los países. Fue puesta en funcionamiento a principios de los años 80, se basaba en estándares como el NMT, AMPS (Advanced Mobile Phone System), TACS, C-450, Radiocom 2000 y TZ, entre otros. Estaba basada en un conjunto de celdas o células interconectadas, que daban servicio a los dispositivos que se encontraban dentro de su amplia zona de cobertura. De ahí el nombre con el que se les conoció inicialmente, “celulares”. No todas las redes estaban basadas en los mismos protocolos, dependían bastante de sus fabricantes, no era fácil interconectarlas ni utilizar los mismos terminales en distintas redes.

La calidad de los enlaces era muy baja, tenía baja velocidad (2400 bauds). La transferencia entre celdas era muy imprecisa ya que contaba con una baja capacidad (basada en FDMA) y la seguridad no existía. La tecnología predominante era AMPS. Las conexiones de subida y bajada de datos se realizaban a tasas de descarga de hasta 10 Kb/s. [1]

1.1.2 Segunda Generación (2G) o GSM

En los sistemas 2G el tráfico de voz fue el dominante frente al de datos. La necesidad de mejorar la calidad de transmisión, la capacidad del sistema y la

cobertura, llevó al desarrollo de los sistemas móviles de segunda generación. Con el avance tecnológico se hicieron posibles las transmisiones digitales. Aún dominaban las transmisiones de voz pero las demandas de otros servicios, como fax, mensajería y transmisiones de datos, crecían rápidamente. Estos sistemas ofrecían voz digital a velocidades relativamente bajas y el poco ancho de banda restante para datos.

Llegó la oportunidad de ofrecer servicios sobre datos en redes de comunicaciones móviles. Los principales servicios de datos introducidos en 2G son: el mensaje de texto (SMS) y el circuito de conmutación de paquetes de datos, que permite el servicio del correo electrónico y otras aplicaciones. La velocidad *peak* de la transmisión de datos en 2G inicialmente fue de 9,6 Kbps. Las altas velocidades de transmisión de datos se introdujeron más tarde en los evolucionados sistemas 2G, mediante la asignación de múltiples *time slots* a un usuario y por los modificados sistemas de codificación.

En 1990 nacen nuevos sistemas como GSM y D-AMPS, que trabajaban a frecuencias de entre 900 y 1800 MHz. Su gran mejora fue tomar los sistemas antiguos y digitalizar la transmisión de la señal por medio de mejoras como TDMA y CDMA para así alcanzar una mayor rapidez, fidelidad y seguridad en la señal. La multiplexación permitió transmitir varias conversaciones de manera simultánea en un mismo canal, por lo que se pudo aumentar el número de usuarios.

También se integra como nuevo servicio el Short Messaging Service o SMS. Cabe destacar que GSM será un gran referente a lo largo de la evolución de la telefonía móvil llegando a ser usado como base fundamental para las futuras generaciones. [1]

La denominada “segunda generación” marcó el paso de la telefonía analógica a la digital, que permitió, mediante la introducción de una serie de protocolos, la mejora del manejo de llamadas, más enlaces simultáneos en el mismo ancho de banda y la integración de otros servicios adicionales al de la voz, de entre los que destaca el Servicio de Mensajes Cortos (Short Message Service). En esta tecnología, los estándares más utilizados son:

- GSM (*Global System for Mobile Communications*)

- CDMA (*Code Division Multiple Access*)
- GPRS (*General Packet Radio Service*)
- EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*)

El Sistema Global de Comunicaciones Móviles, también conocido como 2G o GSM, fue el encargado de estandarizar y proporcionar un marco de compatibilidad a las conexiones móviles. Las primeras implementaciones se dieron a principios de la década de los 90. Utiliza sistemas como GSM, IS-136, Iden, IS-95, TDMA y CDMA. El desarrollo fue el inicio para la digitalización de las comunicaciones. Los principales objetivos eran la interconexión de las redes y la posibilidad de conectarse a ellas con un mismo terminal reduciendo costos significativamente, apareciendo el primer concepto de roaming.

Tenía también una mayor velocidad para transmitir datos, y fax. Es aquí cuando la telefonía móvil se vuelve popular, la transmisión de datos podía alcanzar los 56 Kb/s, intercambiar imágenes y la posibilidad de navegar por Internet. Ésta mejora se debe a la implantación de la tecnología GPRS (General Packet Radio Service) sobre las redes existentes y favorece la aparición de los “Blackberries” y los primeros “smarthphones”. [2]

El llamado Servicio General de Paquetes Vía Radio, más conocido por GPRS, acrónimo de General Packet Radio Service, es básicamente una extensión del sistema GSM desarrollado para la transmisión de datos mediante conmutación de paquetes. Este sistema, ofreció la posibilidad de obtener una significativa mejora en las tasas de transferencia de datos en redes GSM, ya que mediante esta extensión se podían alcanzar hasta 32 Kb/s reales, lo que permitió que se pudieran transmitir datos y voz en forma simultánea, además de acceso a datos que no estuvieran en la red GSM.

Mediante la implementación de la tecnología GPRS, los usuarios de las redes GSM pudieron tener acceso a servicios como los mensajes multimedia (MMS), la mensajería instantánea y la posibilidad de usar el teléfono como modem para la PC mediante la conexión USB. [4]

1.1.3 Generación 2.5 (2.5G)

A finales de los 90s se introdujo lo que llamamos 2.5G, una generación que cumplía con características intermedias entre la 2G y la 3G, presentando mejoras en la capacidad de transmisión de datos mediante el paso de la tecnología de conmutación de circuitos a la de conmutación de paquetes. Este cambio se da por el surgimiento de Internet, el cual trabaja con la tecnología de paquetes en lugar de la tecnología de circuitos, como las comunicaciones de voz de los sistemas 1G y 2G.

Por no existir los medios ni la tecnología para “lanzarse” de lleno la siguiente generación, surge esta generación intermedia en la que se incorporan nuevos sistemas como el EMS y el MMS (como mejoras del SMS) y WAP. La velocidad necesaria para brindar estos servicios la proporcionaron las nuevas tecnologías GPRS (hasta 114 Kbps) y EDGE (hasta 384 Kbps). [6]

1.1.4 Tercera Generación (3G)

El año 2001 fue un año revolucionario en el ámbito de la telefonía móvil ya que supuso la aparición de los primeros celulares que incorporaban pantalla LCD a color, hecho que abría un inmenso abanico de posibilidades en cuanto a adaptación de nuevas funciones.

Así, pronto el usuario pudo presenciar al nacimiento de dispositivos que se consideraban futuristas, tales como: móviles con cámara fotográfica digital, posibilidad de grabar videos y mandarlos con un sistema de mensajería instantánea evolucionado, juegos 3D, sonido MP3 o poder mantener conversaciones por videoconferencia gracias a una tasa de transferencia de datos aceptable y a un soporte para Internet correctamente implementado (correo electrónico, descargas, etc.). [6]

En esta tecnología, el estándar más utilizado es:

- UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) [7]

La idea de un estándar que unifique la tecnología en todo el mundo impulsó la llegada de la tercera generación. Los equipos soportarían altas velocidades de hasta 2 Mbps pero solo en interiores y en modo estacionario. Con alta movilidad,

la velocidad decaería a 144 Kbps. La tecnología 3G agregó facilidades de multimedia permitiendo aplicaciones de audio, video y gráficos al estilo de Internet. Soportaría transmisiones de datos por conmutación de circuitos y por conmutación de paquetes para garantizar la compatibilidad con otros sistemas móviles, en caso de que la 3G aún no estuviera implementada en algunas partes del mundo.

Pero, para la introducción de 3G, el uso de datos se disparó, haciendo que este tráfico se convirtiera en el dominante con la llegada del sistema HSDPA.

3G ofrece alta calidad de transmisión de voz, capacidades multimedia, costos accesibles, eficacia operacional, prestaciones por más de una red en una zona de cobertura, altas velocidades de acceso a Internet y dispone de una gran variedad de servicios.

Con la aparición de 3G y el ancho de banda superior de la interfaz radio de UTRA (Universal Terrestrial Radio Access), fue posible una gran gama de nuevos servicios que sólo habían sido mencionados en 2G y 2.5G. El desarrollo de 3G actualmente es manejado por el 3GPP, sin embargo, los pasos iniciales para 3G fueron realizados a principios del año 1990, mucho antes que se formara el 3GPP. La internacionalización de las normas y estándares fue un factor importante en determinar las bases de 3G. GSM empezó como un proyecto paneuropeo, pero pronto atrajo el interés de todo el mundo cuando GSM se desplegó en una serie de países fuera de Europa. En la actualidad GSM está desplegada en más de 160 países en todo el mundo. [4]

En esta etapa se incorpora el sistema UMTS debido a la necesidad de aumentar la capacidad de transmisión de datos para incorporar servicios como Internet, teleconferencias, entre otros. Se aumenta la seguridad de transmisión y nace 3GPP, organización elaboradora de estándares 3G más importante a nivel mundial.

Los criterios de evaluación para establecer los objetivos de las velocidades de transmisión de datos para 3G sobre conmutación de circuitos y conmutación de paquetes de datos, fueron:

- Hasta 2 Mbps en un entorno de interiores.

- Hasta 144 Kbps en un entorno peatonal.
- Hasta 64 Kbps en un entorno vehicular. [7]

Estas cifras sirvieron de referencia para todas las tecnologías que se compararon con 3G. Sin embargo, en la actualidad los tipos de velocidades de transmisión de datos van mucho más allá de 2 Mbps, gracias al despliegue visto de los sistemas 3G.

Actualmente, la tecnología 3G es la de mayor penetración en el mercado, debido principalmente a las excelentes características y velocidad de subida y descarga que brinda. UMTS utiliza la tecnología CDMA, lo cual le hace alcanzar velocidades realmente elevadas (de 144 kbit/s hasta 7.2 Mbit/s, según las condiciones del terreno).

Sin embargo, la implementación de 3G fue lenta, debido principalmente a que las operadoras telefónicas no realizaban las inversiones necesarias para adaptar su infraestructura a este nuevo protocolo, por lo cual todavía muchos países no cuentan con una cobertura total 3G de su territorio, disminuyendo así la expansión del sistema, pero además provocando en el usuario una serie de problemáticas como un mayor gasto de batería de su dispositivo al estar continuamente en la búsqueda de señal. [7]

1.1.5 Generación 3.5G (3.5G) o HSPA+

HSPA+ es considerada la tecnología 3.5G, predecesora de las tecnologías de redes móviles de Cuarta Generación (4G).

Como paso previo al despliegue completo de la cuarta generación de sistemas móviles, surgieron algunas mejoras de la tercera generación denominadas 3.5G y 3.75G.

La generación 3.5 es básicamente la 3G potenciada, es decir, diseñada para un mejor desempeño. Alcanza velocidades de transmisión descendente de hasta 14 Mbps teóricamente y fue desarrollada para ofrecer servicios multimedia utilizando la conmutación de paquetes.

La generación 3.75G, también conocida como 3.9G, es otra evolución de la tecnología de tercera generación que presenta mayores velocidades en el enlace ascendente, de hasta 5.8 Mbps.

La demanda de mayor velocidad de transmisión, especialmente cuando se tiene alta movilidad, ha experimentado un crecimiento junto con la evolución de las tecnologías móviles y el crecimiento de los operadores que proveen el servicio. La velocidad que se ha conseguido hasta la tercera generación sigue siendo insuficiente, por lo que la cuarta generación continúa con la evolución de los sistemas móviles. [8]

1.1.6 Cuarta Generación (4G)

En febrero del 2007 surge la cuarta generación de redes móviles denominada 4G.

4G se basa totalmente en el protocolo de Internet (IP). Las velocidades de acceso o descarga son de 1 Gbps en reposo, de 100 Mbps en movimiento y hasta 50 Mbps para subida. Además soporta QoS (Quality of Service) que permite ofrecer diversos servicios en tiempo real a un costo menor. La QoS da prioridad al tráfico dependiendo del tipo de aplicación, ajustando los requerimientos de la misma, en función del estado de la red. Entre las aplicaciones se incluyen el acceso móvil a la Web, telefonía IP, servicios de juegos, TV móvil de alta definición, videoconferencias y televisión 3D. [6]

La ventaja sobresaliente de 4G es que proporciona una velocidad de transferencia de datos sobre Internet mayor a cualquier servicio de las redes celulares existentes y, además, busca alcanzar las comunicaciones móviles de banda ancha.

La principal diferencia con su antecesor son las grandes tasas de subida y bajada que puede alcanzar (Teóricamente llegar a 100 Mbps de bajada en movimiento y 1 Gbps estático). [8]

Dentro de las tecnologías consideradas 4G se encuentra la tecnología WiMAX y LTE (*Long Term Evolution*); esta última es la más utilizada por las

compañías de telecomunicaciones para implementar sus servicios 4G ya que ha demostrado tener más eficiencia en las pruebas de laboratorio.

Si bien la primera implementación comercial de LTE se realizó en Estocolmo en el año 2009, no ha sido implementada totalmente, por lo que muchos usuarios de telefonía móvil del mundo todavía no pueden beneficiarse de esta fantástica tecnología. [8]

La Ilustración 1 muestra un esquema a bloques de las expectativas de migración en la telefonía móvil por parte de las operadoras hacia LTE.



Ilustración 1: Expectativas de migración en la telefonía móvil por parte de las operadoras hacia LTE

1.2 Redes inalámbricas

A pesar del creciente uso de datos y de la evolución que se ha experimentado con las redes inalámbricas, éstas aún no proveen las tasas más altas. La tecnología inalámbrica requiere un crecimiento más acelerado para alcanzar las velocidades que se ofrecen con la tecnología alámbrica. Esta evolución es indispensable ya que los usuarios, al estar acostumbrados a altas velocidades alámbricas, demandan las mismas en la tecnología inalámbrica.

La ventaja de los sistemas inalámbricos es la movilidad, es decir, tienen la capacidad de ofrecer un ancho de banda personal independientemente del lugar de ubicación. Esta ventaja hace que el acceso inalámbrico sea una opción muy atractiva para los usuarios y los proveedores del servicio.

Con base a la visión general presentada sobre la evolución de las comunicaciones móviles, previas a LTE, a continuación se presenta una descripción más detallada de la tecnología LTE. [7]

1.2.1 LTE

Uno de los campos que ha registrado mayor evolución en los últimos años ha sido el de los sistemas y servicios de telecomunicaciones. Estos se han convertido en un factor clave para el desarrollo social y económico de un país, y han llevado a las telecomunicaciones a ser consideradas como un servicio público de primordial importancia.

Por lo cual es oportuno el estudio de los sistemas de comunicaciones móviles que cumplen con el objetivo de proporcionar servicios más atractivos.

Actualmente el nuevo estándar de telecomunicaciones denominado LTE es el que presenta mayor crecimiento a nivel mundial. Los operadores están siendo atraídos por los beneficios que esta nueva tecnología promete como: un aumento en el ancho de banda, mayor capacidad de la red, un mejor uso del espectro, la reducción de precios, menor latencia, dispositivos más atractivos para los usuarios y demás prestaciones. [9]

Sin embargo, al momento de la implementación, LTE es una tecnología que presenta varios retos para los operadores, como: obtener acceso al espectro correcto y suficiente, los equipos no responden a las necesidades de los operadores, el control del creciente tráfico de datos, fuentes de financiamiento, infraestructura, entre otros.

La tecnología LTE ya se ha implementado en varios países y se está expandiendo a nivel mundial. No obstante, para algunos, LTE es un concepto relativamente nuevo ya que no se tiene una cultura muy amplia sobre el tema.

LTE es una tecnología de radio acceso de cuarta generación, desarrollada en respuesta a la creciente demanda de alta capacidad de ancho de banda en redes móviles. LTE se introdujo a partir del Release 8 de la 3GPP, como una evolución a las redes HSPA e I-HSPA.

Las soluciones para redes LTE están basadas en una arquitectura plana, de baja latencia, y con una tecnología de radio de alta capacidad. LTE es una tecnología de radio acceso con canales o portadoras de ancho de banda en un rango de 1.4MHz hasta 20MHz. Las bandas de frecuencia estándares en que se

implementa esta tecnología, incluyen las bandas 700MHz, 850MHz, 1700MHz, 1800MHz, 1900MHz, 2100MHz, 2600MHz.

El ETSI propone la creación del 3GPP como nuevo foro mundial que reúne a todas las organizaciones de todos los países, basado en:

- Estándares más globales.
- Orientación a transmisión de datos.
- Economía de escala.
- Funcionalidades avanzadas.
- Evolución controlada en sucesivas versiones.
- Competición entre proveedores.

¿Por qué es necesaria la evolución?

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Necesidad ◆ Capacidad de Red. ◆ Cobertura. ◆ Gestión de tráfico. ◆ Gestión de Señalización. ◆ Localización de usuario. ◆ Especialización. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Usabilidad ◆ Movilidad. ◆ Disponibilidad. ◆ Localización. ◆ Información. ◆ Accesibilidad. ◆ Inmediatez. [20] |
|---|--|

LTE fue diseñado por una colaboración de organismos nacionales y regionales de normalización de telecomunicaciones conocido como el Proyecto de Asociación de Tercera Generación, el cual es mejor conocido como 3GPP Long Term Evolution. LTE evolucionó de un anterior sistema 3GPP conocido como UMTS, que a su vez evolucionó a partir de GSM.

Las características y beneficios principales de LTE se listan a continuación.

- Alta eficiencia espectral.
- Menor latencia para conexiones rápidas y en tiempo real.
- Tasas de carga y descarga más veloces.
- Movilidad constante.
- Manejo de altas cargas de datos.
- Soporte de ancho de banda variable.
- Arquitectura de protocolo simple.

- Posibilidad de handover entre redes dispares incluyendo las redes móviles, redes de línea fija globales, de fibra óptica y privadas, manteniendo una calidad de servicio de alta seguridad.
- Compatibilidad e interoperabilidad con versiones anteriores 3GPP.
- Interacción con otros sistemas, por ejemplo, cdma2000.
- FDD y TDD en una tecnología de radio de acceso único.
- Eficiente multicast/broadcast.
- Una conexión de datos confiable y sin interrupciones. [9]

Con la continua evolución de los sistemas de telecomunicaciones 3GPP en colaboración con la ITU se trabajó para desarrollar LTE Release 8. LTE Release 8, se denomina una tecnología de 3.75G, antecesora de LTE-Advanced, la cual ya cumple con las especificaciones técnicas que permiten denominarla 4G.

1.3 Objetivos de LTE

LTE tiene como objetivo principal, hacer más eficiente el uso del espacio radioeléctrico, lograr velocidades de transferencia más altas y tener mayor capacidad en los servicios soportados. Sin embargo hay que hacer una distinción entre LTE y los sistemas 4G. LTE es un sistema 3.9G según el IMT-Advanced, pues no cumple con los requerimientos para formar parte de los sistemas de cuarta generación, los cuáles deben proporcionar mejoras en los siguientes aspectos: eficiencia espectral, menor latencia para permitir la operación de nuevas aplicaciones sensibles al retardo, bajo costo, compatibilidad con diversas redes, altas tasas de transferencia, admitir una amplia gama de servicios y aplicaciones y movilidad de alto rango.

Aunque LTE no cumple con los requerimientos mínimos de un sistema 4G, es común que se comercialice como un sistema 4G con el único fin de lograr que el producto llegue a los usuarios y se vayan familiarizando.

LTE introduce muchas variantes en relación a sus predecesores, sin embargo existen algunos aspectos relevantes que cabe destacar; por primera vez todos los servicios, incluida la voz, se soportan sobre el protocolo IP, las

velocidades pico pueden alcanzar hasta 100 Mbps, el uso de OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) como interfaz de radio y ancho de banda escalable, donde se tiene la posibilidad de trabajar con canales de distintos anchos de banda que van desde 1.4 MHz hasta 20 MHz. A diferencia de estándares de comunicaciones móviles anteriores como GSM y UMTS, donde existen diferentes dominios para otorgar los servicios de voz y datos, el estándar LTE brinda todos sus servicios basándose en el protocolo IP y por lo tanto trabaja únicamente con conmutación de paquetes. [9]

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

De manera específica el estudio de QoS en la transmisión de VoIP, resulta de vital importancia para determinar la capacidad de esta tecnología para soportar un determinado número de usuarios, con niveles aceptables de QoS.

El objetivo de cualquier servicio de voz es asegurarse de proporcionar una buena calidad de servicio así como una baja latencia.

1.4 Mecanismos de Servicio de Voz

LTE emplea diferentes mecanismos para proporcionar el servicio de voz, tales como:

- **VoLGA (Voice over LTE Generic Access Network)**

Basado en los estándares actuales de 3GPP para la red de acceso genérica cuyo objetivo es permitir a los usuarios de LTE la posibilidad de traspasar una llamada a un dominio de conmutación de circuitos para las redes GSM y UMTS.

- **VoLTE**

Basado en el sistema IMS desarrollado por 3GPP que establece las reglas para una llamada de extremo a extremo, hacia una llamada fuera del alcance de una celda, de roaming y la interconectividad con sistemas anteriores. [10]

- **CSFB (Circuit Switched Fall-Back)**

Esencialmente utiliza una variedad de procesos y elementos de red para permitir recurrir a la conmutación de circuitos 2G o 3G antes de que la llamada sea iniciada. La especificación también permite el envío de SMS, para ello el teléfono utiliza una interfaz conocida como SG, que permite que los mensajes se envíen a través de un canal LTE.

- **VoIP**

Es el mecanismo o tecnología más común y con la cual se tiene una mayor experiencia en el manejo de la calidad de las llamadas que se obtienen con cada uno de los codecs que son posibles implementar. Es la opción más sencilla de implementar por parte de los prestadores de servicios. [10]

1.5 3GPP

3GPP está formado por un grupo de entidades de telecomunicaciones que colaboran para dar las especificaciones técnicas de los sistemas móviles pertenecientes a la tercera generación. Estos trabajan dentro del proyecto IMT-2000 (International Mobile Telecommunications-2000) de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU).

3GPP desarrolla estándares de tercera generación para sistemas basados en GSM y las especificaciones en las que se enfoca son:

- RAN (Radio Access Networks)
- SA (Service & Systems Aspects)
- CT (Core Network & Terminal)
- GERAN (GSM EDGE Radio Access Networks) [9]

El enfoque principal para todas las versiones de 3GPP es hacer que el sistema, tanto el enlace ascendente como descendente, sea compatible en cualquier lugar para asegurar que el funcionamiento del equipo de usuario no tenga interrupciones.

Como un paso hacia las tecnologías 4G móviles de banda ancha inalámbrica, el organismo 3GPP comenzó su investigación inicial del estándar LTE como una tecnología viable en el año 2004. 4G no es una tecnología o estándar definido, sino una colección de tecnologías y protocolos diseñados para permitir el máximo rendimiento de procesamiento sobre la red inalámbrica más barata. [11]

Esta convergencia de tecnologías surge de la necesidad de agrupar los diferentes estándares en uso con el fin de delimitar el ámbito de funcionamiento de cada uno de ellos y con el fin también de integrar todas las posibilidades de comunicación en un único dispositivo de forma transparente al usuario.

1.5.1 Evolución de la arquitectura en 3GPP

Cuando comenzó la evolución de la interfaz de radio, rápidamente se previó un cambio de la arquitectura del sistema:

- Optimización de los servicios por conmutación de paquetes, donde no es necesario soportar la conmutación de circuitos como modo de operación.
- Soporte optimizado para un throughput mayor para que el usuario final experimente una mayor velocidad.
- Mejora en el tiempo de respuesta para la activación y establecimiento de la portadora.
- Mejora en el tiempo de entrega de paquetes.
- Simplificación general del sistema en comparación con los sistemas 3GPP existentes y otros sistemas celulares.
- Interoperabilidad con otras redes de acceso estandarizado por 3GPP.
- Interoperabilidad con otras redes inalámbricas.

Una característica adicional en LTE es evitar la fragmentación de los terminales a nivel mundial por el tipo de multiplexación, ya que las últimas revisiones del estándar son compatibles tanto con FDD (Frequency Division Duplex) que utiliza varias zonas del espectro y TDD (Time Division Duplex) que ocupa una sola zona.

OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) se emplea en el esquema de multiplexación en el enlace descendente de LTE, mientras que en el

enlace ascendente se utiliza SC-FDMA (Single Carrier - Frequency Domain Multiple Access). [9]

Dependiendo de la tecnología y el ancho de banda de la portadora LTE, el sistema permite tasas de throughput de 150Mbps en downlink y de 50Mbps en uplink. El término downlink en redes móviles se conoce a la comunicación en sentido radiobase hacia terminal móvil, mientras que el uplink se refiere a la comunicación del terminal móvil hacia la radiobase.

LTE utiliza como método de acceso OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), además, el desarrollo de funciones avanzadas de LTE como MIMO y agregación de portadoras, permiten el aumento de capacidad y tasas de transmisión.

Dentro de la arquitectura LTE/SAE, la capa de radio acceso se llama E-UTRAN, proveniente de Evolved-UTRAN, y el core de datos o Evolved Pack Core es el EPC. La arquitectura combinada del marco LTE/SAE, comprende el E-UTRAN y el EPC, formando el Evolved Packet System (EPS). [12]

La modulación que brinda el estándar 3GPP hace que las diferentes tecnologías de antenas (MIMO – Múltiple Input, Múltiple Output) tengan una facilidad de implementación, favoreciendo según el medio, y así lograr cuadruplicar la eficacia de transmisión de datos.

Capítulo 2: CONCEPTOS BÁSICOS DE COMUNICACIONES MÓVILES

Las comunicaciones móviles se refieren a cualquier tipo de enlace de radiocomunicación entre dos terminales, de las cuales, al menos una está en movimiento, por lo que se tiene la necesidad de eliminar cables y de fabricar los equipos de tal forma que sean portátiles y fáciles de transportar. En esta sección se abordarán los principales conceptos básicos para entender el funcionamiento de las comunicaciones móviles.

2.1 Capacidad del canal inalámbrico

En sistemas de comunicaciones móviles, el teorema de Shannon nos ofrece una aproximación sobre la capacidad máxima del canal en bps, que se puede obtener en un enlace entre dos nodos y que es afectado por AWGN (Additive White Gaussian Noise). [3]

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

$$C = B \times \log_2 \left(1 + \frac{E_b}{N_0} \times \frac{R_b}{B} \right) \geq R_b$$

En las ecuaciones anteriores, B es el ancho de banda del canal, P/N es la relación señal a ruido, que se relaciona con la energía de bit E_b , que fluye a una velocidad R_b . Por otro lado la potencia de ruido N se relaciona con la densidad espectral de ruido N_0 . Es evidente que este teorema es para un caso ideal, pues no hay consideraciones de interferencias, distancia entre TX y RX, pérdidas por multitrayecto, entre otras.

2.2 Descripción de un sistema celular

- Densidad de usuarios U [usuarios/Km²].
- Tráfico promedio de usuario T [bits/usuario].
- Ancho de banda a utilizar por un proveedor de servicios B [Hertz].
- Eficiencia espectral E [bits/s/Hertz].
- Área de cobertura de una estación base S [Km²].

- Capacidad del operador:

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

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

$$\frac{B \times E}{S} = U \times T$$

$$\left[\frac{\text{bits}}{s \times \text{Km}^2} \right] = \left[\frac{\text{usuarios}}{\text{Km}^2} \right] \times \left[\frac{\text{bits}}{s \times \text{usuarios}} \right] \quad [3]$$

2.3 Modos FDD y TDD

Son técnicas de acceso múltiple, para que la estación base pueda distinguir los datos pertenecientes a distintos usuarios. En la Ilustración 2 se muestran dichas técnicas.

2.3.1 Frequency Division Duplexing (FDD)

En este modo varios usuarios pueden transmitir y recibir en el mismo instante de tiempo pero usando una diferente frecuencia portadora. Los anchos de banda para los enlaces ascendente y descendente son fijos y del mismo tamaño lo cual es propicio por ejemplo para comunicaciones de voz, donde las tasas de envío y recepción son similares. Cuando se opera en modo FDD, la terminal móvil debe ser capaz de transmitir y recibir al mismo tiempo (full-dúplex), lo que se logra mediante un filtro que separa las frecuencias empleadas para un enlace ascendente de las usadas para un enlace descendente. De lo contrario se dice que la terminal trabaja en modo half duplex, pues solo es capaz de transmitir o recibir en un instante dado. [3]

2.3.2 Time Division Duplexing (TDD)

En este modo los usuarios transmiten y reciben dentro de la misma frecuencia portadora pero en distintos instantes de tiempo. En este caso el sistema es capaz de determinar qué tiempo se usa para el enlace descendente y

que tiempo se usa para el enlace ascendente, lo cual es útil para aplicaciones como navegación web, donde la tasa de descarga suele ser más grande que la tasa de carga. Aunque requiere una alta sincronización entre las estaciones base cercana para evitar la interferencia, es usada comúnmente para redes que tienen distintos puntos de acceso aislados unos de otros. [3]

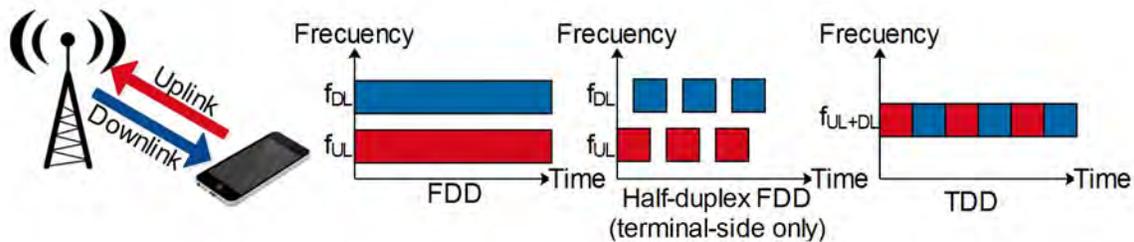


Ilustración 2: Modos FDD y TDD

2.4 Desvanecimientos por multitrayectoria

Recordando que la distancia que separa al TX del RX se traduce en pérdidas por propagación ya que la señal se atenúa conforme recorre una determinada distancia, sin mencionar que en el camino la señal sufre cambios en forma de distorsión, interferencia, y cambios de fase entre otras. Adicionalmente, cuando una señal se propaga por el aire la señal no sigue una única trayectoria si no que debido a los obstáculos se refleja lo que provoca que la señal siga diferentes trayectorias. A este fenómeno se le conoce como multitrayectoria (ver Ilustración 3). [3]

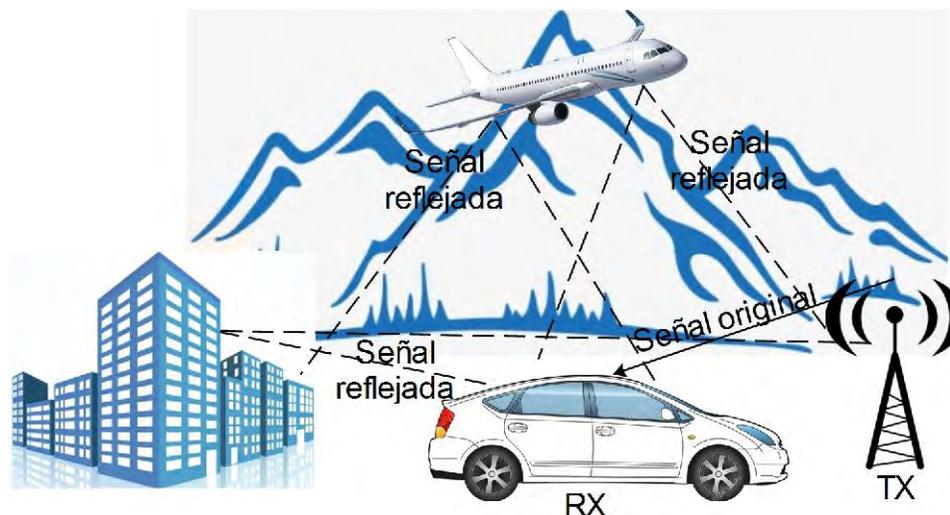


Ilustración 3: Efecto multitrayectoria

En el receptor, las señales reflejadas llegan instantes después, mientras que la señal original o señal en línea de vista (*Line Of Sight, LOS*) llega en un instante de tiempo que siempre es inferior al de las señales reflejadas. Cuando el receptor hace la suma de estas señales puede darse el caso en el que la amplitud máxima de la señal en línea de vista se encuentre en contrafase con alguna o varias de las amplitudes de las señales reflejadas lo que resulta en una señal con una amplitud muy pequeña que no puede ser reconocida. A esto se le llama desvanecimientos por multitrayectoria (*Multipath fading*). [3]

2.5 Interferencia inter-símbolo

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

En un sistema ideal (teórico), los símbolos transmitidos llegan al receptor sin ningún daño o interferencia, como se muestra en la Ilustración 4.

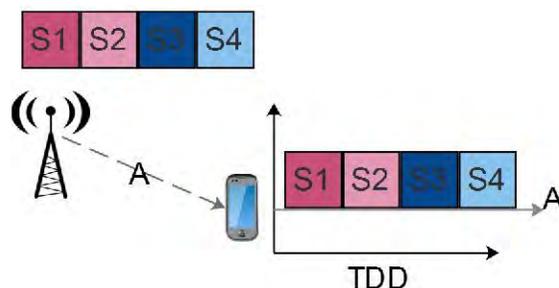


Ilustración 4: Interferencia inter-símbolo

Pero en un escenario real las señales transmitidas se ven afectados de diferentes maneras, por ejemplo, de acuerdo con el entorno de propagación.

Lo que sucede en la práctica es que "la misma" señal llega a través de varios caminos, como se muestra en la Ilustración 5 ("Multipath") y por lo tanto con diferentes retardos ("Delay Spread").

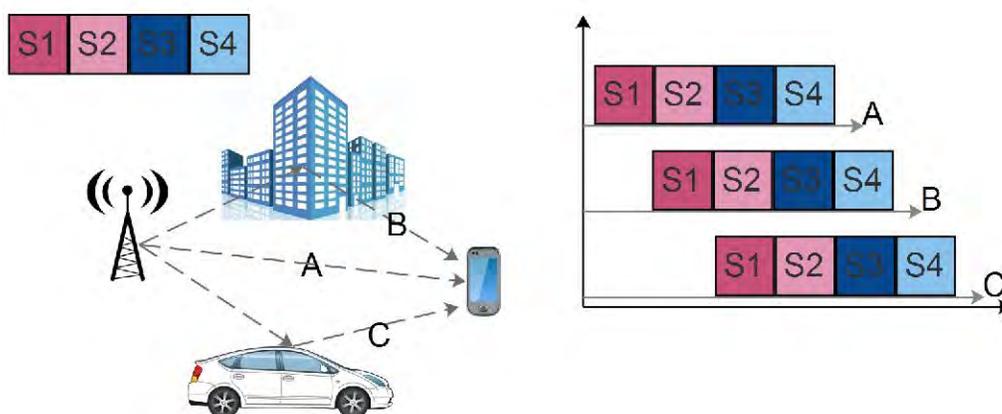


Ilustración 5: Multipath

Aunque el "Multipath" trae beneficios positivos, "Multipath" y "Delay Spread" también terminan causando interferencia entre símbolos. [14]

2.6 Reutilización de frecuencias

Existe una banda de frecuencias asignada únicamente a comunicaciones celulares. Lamentablemente esta es pequeña y permite el acceso de muy pocos usuarios a la red. Con el afán de aumentar la capacidad de las redes móviles, las frecuencias se reutilizan en varias celdas separadas

por una distancia suficiente para que la interferencia entre los canales que utilizan las mismas frecuencias sea mínima o nula.

Un usuario que se mueve dentro de la cobertura de un sistema celular no siempre va a permanecer en una sola celda, sino que va a necesitar cambiarse de acuerdo a su movilidad. Para realizar este cambio, el usuario, que está conectado a la BTS (Base Transceiver Station) de la celda actual, debe comunicarse con la BTS de la celda a la que se está cambiando, en caso contrario la comunicación se perderá. El handover o handoff es la técnica que se utiliza para realizar el traspaso de celda sin que la comunicación se corte y que el proceso de cambio sea imperceptible para el usuario.

El cambio lo realiza el MSC porque es el elemento que lleva el control de la red. [15]

Durante el proceso de handover, el móvil se desconecta de la estación base origen y permanece un tiempo del orden de milisegundos sin conexión con ninguna otra. Es decir, la conexión con la BTS original se corta antes de realizar la nueva conexión con la nueva BTS. [15]

Durante el proceso de traspaso el móvil estará conectado mediante un canal a la BTS origen y mediante otro canal a la BTS destino. De esta forma no se producen interrupciones del enlace y la transmisión se realiza en paralelo por los dos canales.

Con este método se asegura una conexión con la estación base de la nueva celda antes de cortar la conexión con la anterior. [9]

2.7 Tipos de Modulación

La modulación es el proceso que se usa para transportar la información sobre una onda portadora. Consiste en hacer que, ya sea la amplitud, la frecuencia o la fase de una onda portadora, cambie según las variaciones de la señal de información que se desea transmitir.

Hay dos tipos de modulación: Modulación analógica y Modulación digital.

La primera se realiza a partir de señales analógicas de información. Los parámetros de la portadora varían directamente en proporción a la señal de información, por ejemplo la voz humana, audio y video en su forma eléctrica.

Mientras que la segunda se lleva a cabo a partir de señales generadas por fuentes digitales. Los parámetros de la portadora varían según los estados discretos de una señal digital de información. Los sistemas móviles utilizan principalmente este tipo de modulación. [9]

2.8 Tecnologías de acceso múltiple

Para el acceso se utilizan diversas formas de multiplexación, es decir que acepta la transmisión de varias señales en un solo canal. En los sistemas de comunicación, la multiplexación permite a más de un usuario acceder a un sistema al mismo tiempo.

Existen cuatro formas básicas de acceso multiplexado para sistemas inalámbricos:

FDMA: La banda de frecuencias se divide en varios canales y los usuarios ocupan uno de ellos para su comunicación. Cuando un usuario desocupa el canal, este se le asigna a otro usuario. FDMA es la asignación ordenada de canales de frecuencia a los usuarios que solicitan el servicio. [16]

TDMA: Es el proceso en el que se comparte un canal de radio dividiéndolo en ranuras de tiempo (time slots). Se asigna a los usuarios una ranura a cada uno en un mismo canal de comunicación. Así se da servicio a los usuarios alternando el uso del canal, dándoles tiempos de transmisión por turnos. [16]

CDMA: En esta técnica los usuarios comparten el mismo canal y al mismo tiempo. Para diferenciar la información de cada usuario, se asigna un código único a cada individuo. Por esto se dice que se utilizan canales codificados. [16]

2.9 Técnicas de duplexado

Generalmente las comunicaciones son bidireccionales, es decir, se genera información desde ambos extremos de la comunicación. Por lo tanto, es necesario contar con técnicas que soporten dos enlaces: ascendente (móvil

a estación base) y descendente (estación base a móvil). Estas técnicas se conocen como mecanismos de duplexado, y básicamente pueden ser por división de tiempo (TDD) o de frecuencia (FDD).

FDD: Duplexado por División de Frecuencia significa que los enlaces ascendente y descendente utilizan diferentes frecuencias para transportar la información, lo que permite que ambas transmisiones se den al mismo tiempo.

TDD: En el caso del Duplexado por División de Tiempo se emplea la misma frecuencia para ambos enlaces, pero una parte del tiempo se transmite en un sentido y el resto del tiempo se transmite en el sentido contrario. Por lo tanto, las transmisiones no son simultáneas.

Los tiempos que se asignan a cada enlace dependen de la cantidad de datos que esté transmitiendo. [9]

2.10 Evolución de las comunicaciones móviles

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

Más tarde en la década de 1980, salió a la luz el primer estándar de telefonía móvil para la población civil, desarrollada por los laboratorios Bell llamado AMPS, considerado un estándar de primera generación (1G). El único servicio que se ofrecía era voz, los equipos eran grandes, pesados y caros por lo que las únicas personas que tenían acceso a este servicio eran exclusivamente gente de negocios. En la década siguiente surgen los estándares de segunda generación 2G, de los cuales los más populares son IS-136 o DAMPS (*Digital-AMPS*) y GSM. Elaborados por los laboratorios Bell en los Estados Unidos y 3GPP en la Unión Europea respectivamente. Lo más destacable fue la opción

del envío de mensajes de texto. En este punto, GSM fue el estándar que más fue adoptado alrededor del mundo ya que IS-136 requería el pago de patentes, mientras que GSM era de uso libre. Debido a este éxito, GSM lanza su extensión llamada GPRS que permite el envío de contenido multimedia (imágenes y videos) por lo que se le considera un estándar 2.5 G.

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

Tabla 1: Evolución de Telefonía Celular

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

2.11 Redes de banda ancha

Durante los últimos años del siglo XX las redes de datos comenzaron a tener un crecimiento exponencial debido a la alta demanda de servicios por parte de los usuarios y al incremento mismo de la cantidad de usuarios, lo anterior, aunado al avance tecnológico nos lleva a un presente donde es prácticamente indispensable tener acceso a las redes inalámbricas que proveen servicios de voz, datos, web, etc., mismas que comunican a la personas. Debido a esto, los sistemas deben lograr solventar dichas demandas de tráfico de datos, de esta manera, surge el concepto de Sistemas o Redes de Banda Ancha. [3]

En la actualidad el servicio de banda ancha es otorgado a través de tecnologías como ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*), telefonía 3G, WiFi, WiMAX y LTE. A excepción de ADSL, las tecnologías mencionadas anteriormente son de tipo inalámbrico y por consiguiente presentan diversas limitantes, entre las que destacan la movilidad y la velocidad de transmisión de datos. El problema de la movilidad se relaciona con la ubicación de los puntos de acceso, el área de cobertura y el efecto que provoca en las señales el hecho de que el nodo destino este en movimiento. Por otro lado el problema de la velocidad de transmisión de datos está vinculado con el aprovechamiento del ancho de banda. Estos problemas son constantemente atacados mediante la investigación de nuevas técnicas de codificación, multiplexación, modulación, etc. Lo anterior, aunado a la evolución constante de la electrónica que sencillamente no se ha detenido desde que en los años 1950's apareció la válvula termoiónica o bulbo. [7]

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

2.12 Arquitectura general de sistemas celulares

En la Ilustración 6, se presenta la arquitectura básica que poseen las redes de telefonía celular, en la cual destacan tres elementos principales; el equipo de usuario, la red de acceso y la red troncal.

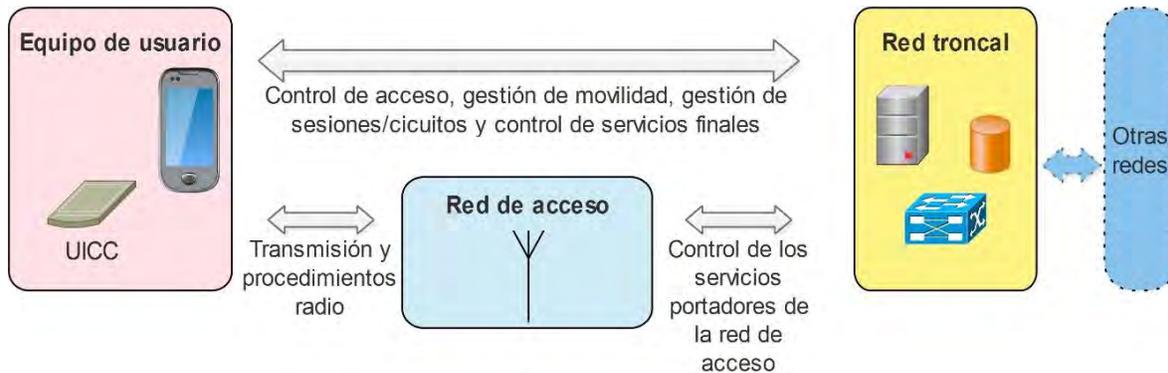


Ilustración 6: Arquitectura general de una red de telefonía celular

2.12.1 Equipo de usuario

Los equipos de usuario son los dispositivos finales que permiten al usuario acceder a los diferentes servicios ofrecidos por las redes mediante la interfaz de radio. Están compuestos por dos elementos: el equipo móvil y el USIM, como se muestra en la Ilustración 7 (Universal Subscriber Identity Mobile). [6]

El equipo móvil es un dispositivo electrónico como: una laptop, un smartphone, una tablet, etc., que permite al usuario final interactuar de manera amigable con la red móvil.

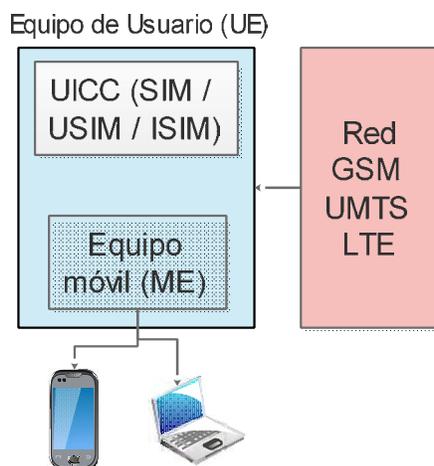


Ilustración 7: Arquitectura de Equipo de Usuario

El USIM es una aplicación ubicada dentro de una tarjeta removible llamada UICC (Universal Integrated Circuit Card). Esta aplicación se encarga de autenticar a un usuario en la red proporcionando así la seguridad de que la transmisión de los datos se da únicamente entre los usuarios a quienes les corresponde. [9]

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

2.12.2 Red de Acceso

Elemento que se encarga de la conexión entre los equipos de usuario y la red troncal a través de la interfaz de radio. Provee servicios portadores cuya función es otorgar una cierta capacidad de transmisión además de gestionar de manera eficiente los recursos de radio disponibles. De forma general se compone de la estación base y dispositivos de control de la estación base. [3]

2.12.3 Red Troncal

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

Esta estructura ha sido adoptada por redes de sistemas celulares de segunda y tercera generación y claro, es retomada por la red LTE, debido a que la separación entre la red de acceso y la red troncal flexibiliza la escalabilidad, además de que permite la evolución natural de las redes de banda ancha lo que se traduce en el fácil cambio de equipos y elementos por los más modernos. [9]

CAPÍTULO 3: ARQUITECTURA GENERAL DEL SISTEMA LTE

En las especificaciones se denomina a la arquitectura del sistema LTE como *Evolved Packet System* (EPS). La idea es la misma que en las otras generaciones, dividir el sistema en tres elementos. Un equipo de usuario, una nueva red de acceso que denominaremos E-UTRAN y una red troncal que denominaremos EPC. Todos los componentes que engloban este sistema están diseñados para soportar todo tipo de servicios de telecomunicación mediante mecanismos de conmutación de paquetes, por lo que no es necesario disponer de un dispositivo que trabaje en modo circuito, ya que en el sistema LTE los servicios con restricciones de tiempo real se soportan también mediante conmutación de paquetes. [9]

Otra característica de LTE es que se contempla también el acceso a sus servicios a través de UMTS y GSM. También mediante otras redes de acceso como CDMA2000, Mobile WiMAX, redes 802.11, etc.

La red física que se utiliza en LTE para interconectar todos los equipos de la red, que se denomina red de transporte, es una red IP convencional. En la infraestructura de red LTE aparte de los equipos que realizan las funciones específicas del estándar, también habrá elementos de la red propios de redes IP como routers, servidores DHCP, servidores de DNS, switches, etc. [3]

3.1 Descripción de la arquitectura del sistema

La arquitectura LTE está diseñada con el objetivo de soportar tráfico de conmutación de paquetes; con movilidad sin fisuras, calidad de servicio y mínima latencia. Presenta una arquitectura más plana y simplificada, con sólo dos tipos de nodos; el núcleo de red llamado *Evolved Packet Cores* (EPCs) y la red de acceso conocida como E-UTRAN, la arquitectura completa es denominada como 3GPP *Evolved Packet System* (EPS).

El Core de conmutación de paquetes para las redes LTE Release 8 de 3GPP ha sido rediseñado y llamado System Architecture Evolution (SAE) o también EPS (Evolved Packed System). SAE logra interconectar diversas redes de acceso, que en algunas ocasiones pueden ser heterogéneas entre ellas.

La arquitectura SAE sigue los mismos parámetros de diseño de las redes 3GPP antecesoras, sin embargo divide las funciones del Gateway de Control (SGSN en UMTS) en un plano de control comandado por el MME (Mobility Management Entity) y un plano de usuario liderado por el SGW (Serving Gateway). Las funciones originales del GGSN son implementadas por el PDN Gateway (PGW). [18]

Los componentes principales de una solución LTE son: MME, SGW, PGW, PCRF y HLR.

La Ilustración 8 muestra la arquitectura general de una red 4G basada en LTE.

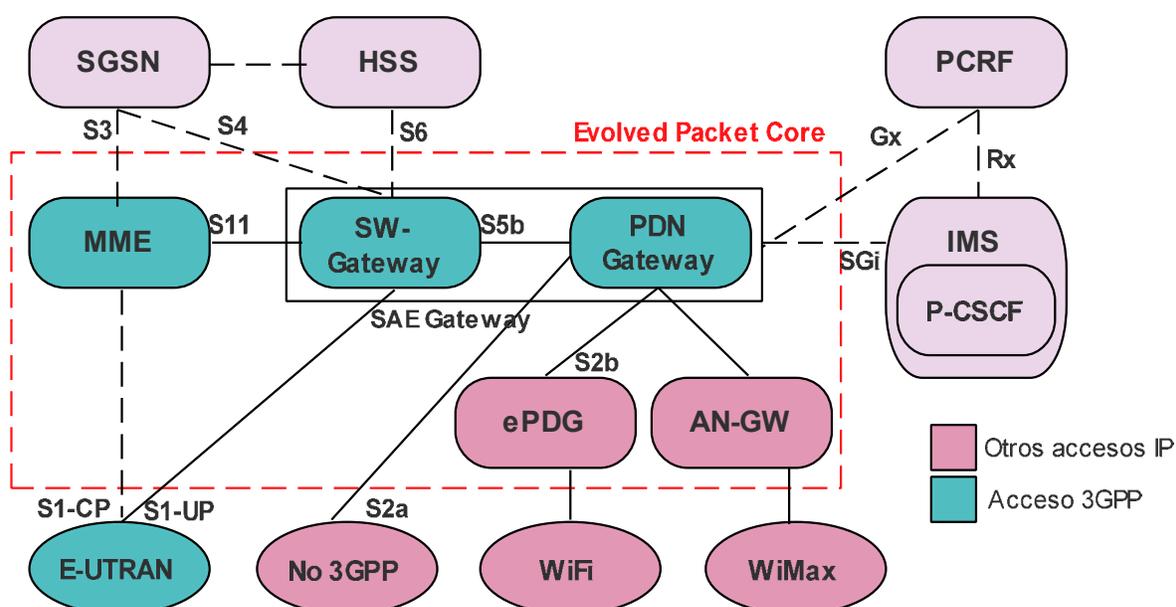


Ilustración 8: Arquitectura de red 3GPP LTE Release 8

MME: El MME obtiene datos del suscriptor a través de la información almacenada en el HSS. El MME autentifica, autoriza y selecciona el PDN apropiado para establecer el enlace entre el EUTRAN a las redes o servicios externos. MME también realiza funciones de administración de movilidad y recolecta información de cobro. El MME proporciona conectividad entre el Nodo B y la red GSM/UMTS existente a través del SGSN (Serving GPRS Support Node). [9]

Constituye una entidad del plano de control, encargada únicamente de la señalización por lo que por ella no transitan los paquetes con tráfico de datos de

los usuarios. Mediante el interface S3 basado en protocolo GTP, al igual que el interface S4 se realiza el control de señalización para la movilidad con redes 3GPP e interactúa con el HSS a través del interface S6a, basado en Diameter como responsable de realizar el proceso de autenticación de los usuarios.

Aporta a los operadores la ventaja de aumentar la capacidad de señalización de forma independiente del tráfico de usuario, ya que es un elemento de red dedicado a la señalización y separado funcionalmente de los gateways. [15]

Disponer de un elemento de red dedicado a la señalización y separado funcionalmente de los Gateways, aporta a los operadores la ventaja de poder crecer la capacidad de señalización de forma independiente del tráfico de usuario.

Gracias a la flexibilidad de la arquitectura es posible el empleo de un único nodo para implementar el SGSN y el MME, permitiendo disponer de una red con un núcleo de paquetes común para múltiples tecnologías como GSM, UMTS/HSPA y LTE. [9]

SGW: El SGW es un equipo de plano de usuario que es controlado por el MME. El SGW también es un punto de monitoreo de las políticas de conexión y servicio establecidas en el PCRF (Policy and Charging Rules Function). [18]

PGW: El PGW puede ser comparado con las funciones realizadas por el GGSN pero además tiene un importante rol en el control de la movilidad. El PGW asigna la dirección IP al UE. También permite la interoperabilidad con CDMA200 y redes WiMAX.

Adicional a estos nodos, EPC también incluye el HSS (Home Subscriber Server) y PCRF (Policy Control and Charging Rules).

PCRF: Es el encargado del control de políticas, así como el control de las funciones de tarificación en el PCEF (Policy Control Enforcement Function). Éste dispositivo es el encargado de proveer la calidad del servicio (QoS), es decir, decide como un determinado flujo de datos será tratado en el PCEF y asegura que esté de acuerdo a la suscripción del usuario.

HLR: El HLR contiene los datos de cada suscriptor y el perfil. También contiene la información acerca de los PDN a los que el usuario se puede conectar.

Comúnmente los PDN son conocidos como APN. Adicionalmente el HLR también almacena la información dinámica, tal como la identidad del MME al que el usuario está actualmente registrado. En algunos casos el AUC (Authentication Centre) está integrado en el HLR, el AUC genera los vectores de autenticación y las llaves de seguridad.

UE: El equipo de usuario (UE) contiene en su interior una tarjeta UICC con información del usuario así como información sobre sus suscripción.

UE es el dispositivo que el usuario utiliza para la comunicación con la red. Normalmente se trata de un dispositivo portátil como un teléfono inteligente o una tarjeta de datos, como las que se utilizan actualmente en las redes 2G y 3G.

Es el equipo que permite al usuario conectarse a la red LTE y disfrutar de los servicios que nos proporciona a través de la interfaz radio. La arquitectura funcional de un equipo de usuario es la misma que se definió para GSM y UMTS. [9]

El equipo de usuario (*User Equipment*, UE) contiene dos elementos básicos: un módulo de suscripción del usuario (SIM/USIM) y el terminal móvil propiamente dicho (Mobile Equipment, ME). A su vez, el SIM/ME considera dos entidades funcionales: la terminación móvil (MT) y el equipo terminal (TE). A continuación definimos todos estos elementos.

- Módulo de suscripción de usuario: La SIM/USIM está asociada a un usuario y por tanto es quien le identifica dentro de la red independientemente del equipo móvil utilizado. La separación entre SIM y ME facilita que un usuario pueda cambiar de terminal sin necesidad de cambiar de identidad, de SIM.
- El equipo móvil (ME): en él se integran las funciones propias de comunicación con la red celular, así como las funciones adicionales que permiten la interacción del usuario con los servicios que ofrece la red.
- Terminación móvil (MT): alberga las funciones propias de la comunicación. o Equipo terminal (TE): equipo que se ocupa de la interacción con el usuario. [18]

E-UTRAN: La red de acceso que para LTE se denomina red E-UTRAN conformada por la estación base llamada Evolved NodeB (eNB) que otorga conectividad a los UEs y que sirve como enlace entre los diferentes UEs y la red troncal EPC, haciendo uso de los protocolos de la interfaz de radio. Transmite paquetes hacia los UEs mediante los servicios portadores llamados Radio Bearers y lo más importante, se encarga de la gestión de los recursos de radio, así como mecanismos de control de admisión y de handover. El eNB se puede conectar a distintas entidades MME y S-GW, con el fin de dar redundancia lo que se traduce en mayor robustez y eficiencia (ver Ilustración 9). [3]

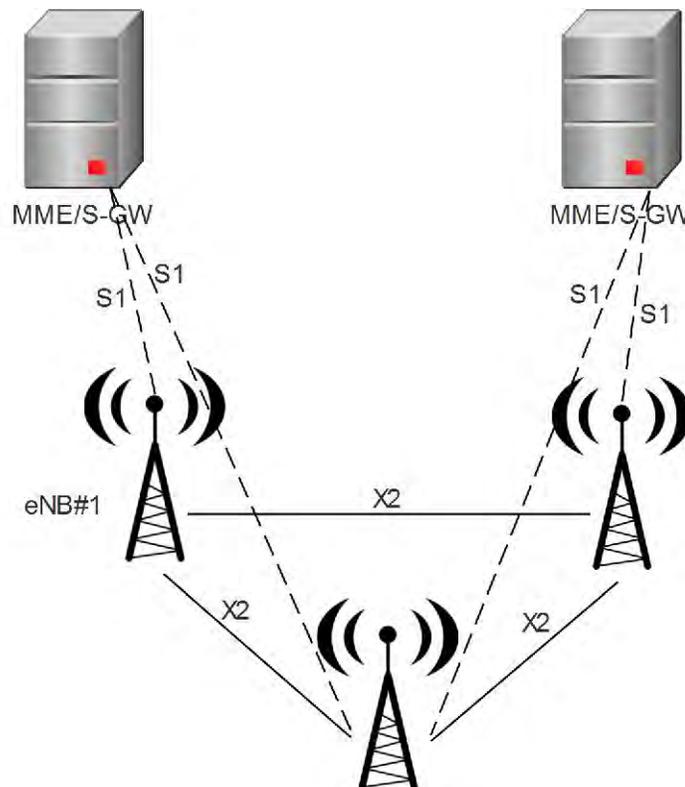


Ilustración 9: E-UTRAN

E-UTRAN es responsable de todas las funciones de radio, algunas de ellas son:

- Administración de los recursos de radio: Abarca las funciones relacionadas con las portadoras de radio.
- Compresión de los encabezados: Ayuda a asegurar un uso eficiente de la interfaz de radio, se comprimen los encabezados de los paquetes IP,

que representan un aumento en la capacidad de procesamiento, sobre todo en los paquetes de VoIP.

- Seguridad: Todos los datos enviados mediante la interfaz de radio son encriptados.
- Conectividad al EPC: Comprende toda la señalización hacia el MME y la trayectoria de la portadora hacia el SGW.

Del lado de la red, todas esas funciones residen en el e Nodo B, que es capaz de administrar múltiples células. LTE integra todas las funciones de radio control en el e Nodo B, lo que permite una estrecha interacción entre las distintas capas del stack de protocolos en la red de radio acceso, reduciendo así la latencia y mejorando la eficiencia. [3]

La red troncal: Conformada por el EPC que contiene dentro de sí diversas entidades, de las cuales MME (*Mobility Management Entity*), S-GW (*Serving Gateway*) y P-GW (*Packet Data Network Gateway*) son las más importantes. Además proporciona conectividad a la red LTE mediante redes como GERAN, UTRAN, CDMA2000 y WiMAX, así como de proporcionar acceso a los usuarios a redes como internet. [19]

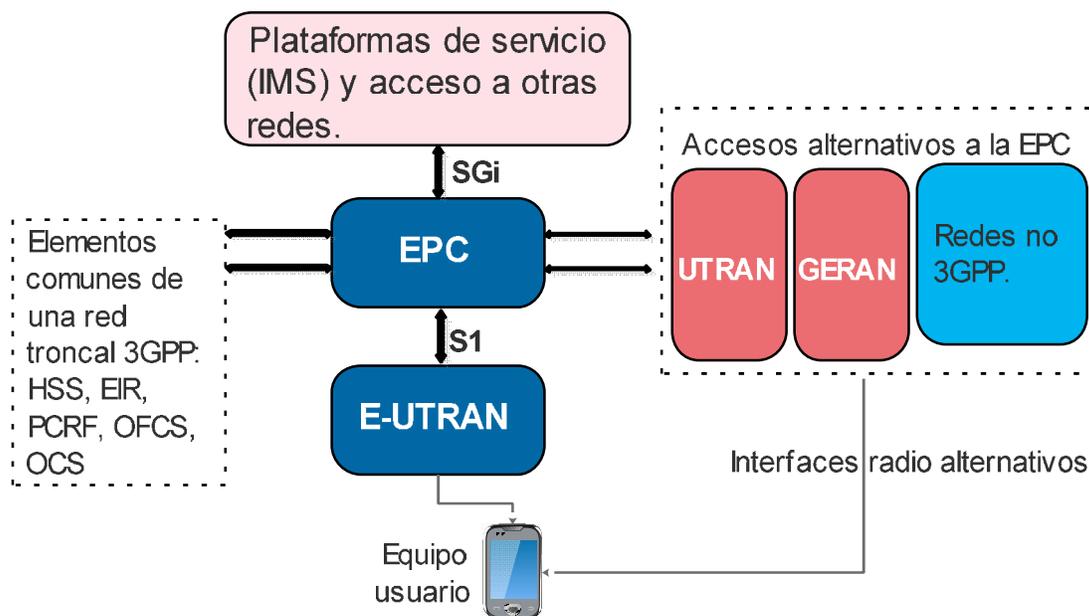


Ilustración 10: Arquitectura de red LTE

3.2 Arquitectura del Sistema Evolucionado (SAE)

Aproximadamente al mismo tiempo de la evolución de HSPA y el inicio de LTE, el 3GPP decidió asegurarse de que un operador pueda coexistir fácilmente entre HSPA y LTE a través de un núcleo de red. Este trabajo fue dirigido por el Grupo de Trabajo SA realizando el estudio del *System Architecture Evolution* (SAE).

Una red se constituye básicamente en torno a dos tipos de elementos y una adecuada combinación de estos, posibilitando la comunicación tanto entre teléfonos móviles, como entre un teléfono móvil y un teléfono fijo. Estos elementos son:

- Estación base: que son las encargadas de transmitir y recibir la señal.
- Centrales de conmutación: son las que permiten la conexión entre dos terminales concretos. [18]

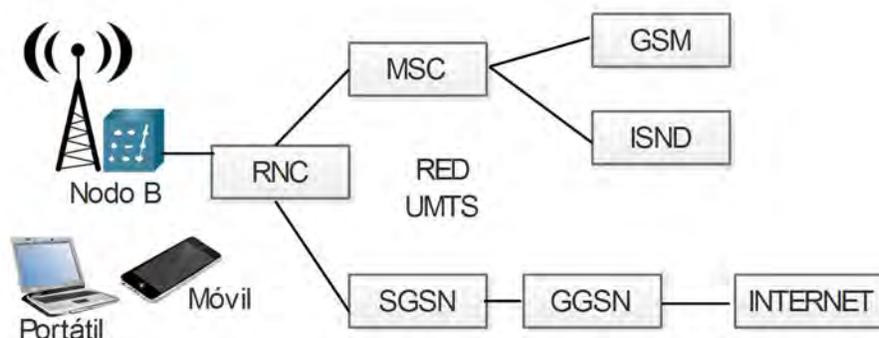


Ilustración 11: Arquitectura 3G

En la Ilustración 11, se muestra la arquitectura 3G, en la cual, los datos llegan al nodo B (estación base) que es el encargado de recopilar las señales mandadas por los terminales, pasando éstas al RNC o Controlador de la Red de Radio para ser procesadas. El conjunto de los nodos y el RNC constituyen una estructura denominada Red de Acceso de Radio (RAN), la cual conecta los terminales con el Núcleo de Red o *Core Network*, desde el cual se distribuyen los datos por los distintos sistemas mediante una serie de conmutaciones. Según sea su destino, deberán pasar por el MSC (*Mobile Services Switching Center*) o por el SGSN (*Serving GPRS Support Node*) y GGSN (*Gateway GPRS Support Node*).

La filosofía SAE está enfocada en el dominio de conmutación de paquetes y en emigrar fuera del dominio de conmutación de circuitos. Esto se hace a través de los próximos “*Releases 3GPP*”, para así llegar a la evolución del núcleo de red de paquetes, *Evolved Packet Core* el que apoyará tanto a *HSPA Evolution* como a LTE, asegurando que LTE pueda ser desplegado en islas más pequeñas, solo donde sea necesario. [9]



Ilustración 12: Estrategia de despliegue HSPA y LTE

En primer lugar, el operador puede actualizar su red HSPA a una red con capacidad *HSPA Evolution* y a continuación, añadir las celdas LTE donde carece de capacidad o cuando el operador quiera probar los nuevos servicios que no pueden ser suministrados por *HSPA Evolution* (ver Ilustración 12). Este enfoque reduce los costos desde el despliegue de LTE, ya que no es necesario construir más, porque se tiene cobertura nacional desde un principio. [3]

3.2.1 SAE Gateway

Está formada por dos entidades lógicas del plano de usuario, el *Serving Gateway* y el *PDN Gateway*, sirviendo de interface entre la red de acceso y las diferentes redes de paquetes. En la práctica y en función de los escenarios desplegados, ambos gateways se pueden implementar como un único elemento de red. [13]

El *Serving Gw* se encarga entre otras de las siguientes funciones:

- Interviene de forma activa en el proceso de movilidad cuando se produce un traspaso (handover) entre eNBs.

- Mediante el interfaz S4, basado en protocolo GTP es la entidad involucrada con el tráfico de usuario en caso de movilidad entre LTE y otra tecnología 3GPP.
- En caso de ser necesario disponer de información del tráfico de usuario ante un requerimiento judicial, se encarga de replicar dicha información.

Por su parte el *PDN GW* se considera el punto de entrada/salida del tráfico hacia/desde el usuario, proporcionando conectividad hacia el resto de redes externas y destacando las siguientes tareas:

- A través del interfaz S7 se realiza la transferencia de las políticas de calidad de servicio y tarificación que se aplican al tráfico de usuario entre el PCRF y el PDN GW.
- Facilita la movilidad transparente y la continuidad en las sesiones de usuario cuando éste se desplaza entre redes de acceso tecnológicamente heterogéneas, es decir desde una red alineada con el 3GPP (GSM, UMTS, HSPA) a otra red no alineadas con el 3GPP (Wimax o WiFi), o viceversa. [9]

Entre las redes que no forman parte de la familia de estándares del 3GPP, se pueden distinguir dos tipos de acceso: «Confiado» y «Desconfiado», siendo el operador el que decide de que tipo es cada una de las redes a las que les permite su conexión, teniendo en cuenta no sólo su tecnología de acceso, si no también basándose en aspectos de negocio.

La interconexión con una red de las consideradas «Desconfiada» se realiza empleando un ePDG, que implementa protocolos de movilidad IP como por ejemplo PMIP, siendo necesario para acceder a los servicios que ofrece el operador, que el terminal del usuario establezca un túnel IPsec con el ePDG mediante el interface Wn.

La interconexión con redes de «Confianza» no emplea el ePDG, por lo que se emplean directamente protocolos PMIP con el PDN-GW, mediante el interfaz S2a. [3]

3.2.2 Servicios

EPC permite al operador de la red móvil ofrecer al usuario, un nuevo conjunto de servicios a través de su arquitectura plana. Proporciona una serie de características al operador a fin de apoyar el aprovisionamiento, supervisión, control y cobro de estos servicios. A continuación se dará una breve descripción de los servicios que EPC permite.

Servicio de Datos: LTE y EPC han sido diseñados para permitir servicios IP, lo que significa, en teoría, que cualquier aplicación que necesite comunicación IP, puede utilizar el servicio de acceso IP que ofrece EPC.

Servicio de Conmutación de Circuitos: Uno de los temas que aún no se ha definido para EPS es la administración de los servicios de conmutación de circuitos. Existen varias opciones, entre ellas las siguientes:

- *Circuit Switched Fall-Back (CSFB)* define un mecanismo para el uso de una red de conmutación de circuitos para proporcionar servicios de voz en una red LTE. CSFB permite al suscriptor el traspaso a la red de circuitos para recibir servicios de voz y luego regresar a LTE cuando se haya terminado. Cuando un suscriptor desea hacer una llamada de voz, UE hace una solicitud de servicio a la red LTE, la cual coordina con la red 3GPP de versiones anteriores para redirigir al UE a la red de conmutación de circuitos (CS).
- *Multimedia Telephony (MMTel)* ha sido diseñado para ofrecer llamadas de voz usando IMS. Ofrece más posibilidades que una llamada de voz en una red de conmutación de circuitos. Es una elección para ofrecer servicios de voz cuando se está dentro de la cobertura LTE, sin embargo, no se puede confiar en el hecho que la cobertura LTE esté presente cuando el usuario realice una llamada de voz.
- *Single-Radio Voice Call Continuity (SRVCC)* define una solución de como las llamadas de voz basadas en IP pueden ser entregadas de un sistema "A" a un sistema "B" que permite a la llamada de voz utilizar procedimientos de conmutación de circuitos. La red LTE determina que la llamada de voz tiene que ser trasladada a un dominio de circuitos.

Esta notifica al servidor *Mobile Services Switching Center* (MSC) y se inicia un *handover* de la portadora de voz de LTE a la red de circuitos. El servidor MSC establece una ruta de portadora para el móvil en la red y notifica al núcleo IMS que la llamada se está moviendo del dominio de paquetes al de circuitos. El núcleo IMS realiza las funciones necesarias para el interfuncionamiento. Cuando el móvil llega a la red, esta cambia de un proceso de VoIP a un circuito de voz, y continúa la llamada. [9]

3.3 El Núcleo de Red SAE: Evolved Packet Core

Cuando se inició la estandarización de la RAN LTE, se comenzaron los trabajos correspondientes para el CN LTE bajo el *System Architecture Evolution* (SAE). El núcleo de red definido en el sistema SAE es una evolución radical del núcleo de red GSM/GPRS, y por esto es que tiene un nuevo nombre, *Evolved Packet Core* o EPC (Núcleo de Paquetes Evolucionado). El sistema SAE sólo abarca el ámbito de conmutación de paquetes, no el de conmutación de circuitos. Mirando hacia atrás, la filosofía de reducir al mínimo el número de nodos también reina en la normalización del núcleo de red. En consecuencia, la red EPC comenzó como una arquitectura de un solo nodo con todas las funciones en el mismo, excepto el *Home Subscriber Server* (HSS), el cual se mantiene fuera del nodo. El HSS es un nodo de base de datos correspondiente a el HLR del núcleo de red GSM/WCDMA.

En la Ilustración 13 se muestra como el *Evolved Packet Core* se ajusta en el total de la arquitectura. El EPC se conecta a la RAN LTE a través de la interfaz S1, a Internet a través de la interfaz SGi y al HSS vía interfaz S6. S1 es la interfaz entre los eNBs y EPC, que es muy similar a la interfaz lu_ps. El S1 y el plano de usuario lu_ps son túneles de transporte basados en IP, que no conocen el contenido del paquete enviado. Los paquetes IP del usuario final son puestos en el túnel IP S1 por el EPC o el eNB y recuperados en el otro extremo (eNB o EPC). [20]

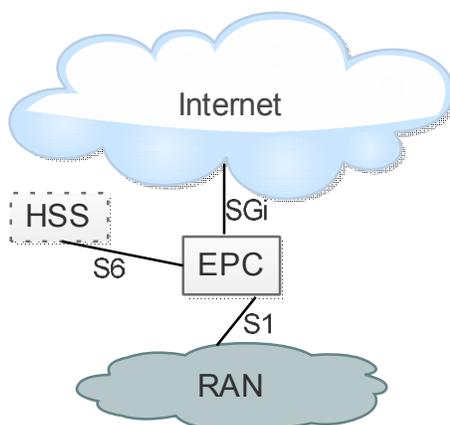


Ilustración 13: Descripción simplificada del Core Network SAE de LTE

Para el plano de control la diferencia entre S1 y lu_ps no es mucha, de hecho, es sólo en los detalles del establecimiento portador que es visible. La diferencia radica en la forma de indicar la calidad asignada en el servicio del flujo específico de un usuario. Para LTE se hace por medio de la que apunta a una clase de prioridad específica.

La interfaz S6 mostrada es la que conecta el EPC al HSS. Ésta se trata de una evolución de la interfaz Gr utilizada por WCDMA/HSPA para conectarse al HLR. Por lo tanto, una combinación de HLR/HSS para el Núcleo de Paquetes Evolucionado, puede ser la misma como la representada de GSM en el núcleo de red de WCDMA.

Quizás la mayor diferencia entre WCDMA/HSPA y LTE es el manejo de la movilidad. En LTE, el EPC actúa como un anclaje en el núcleo de red SAE para la movilidad, siendo un nodo EPC que maneja el plano de usuario no cambiado durante una conexión. El EPC toma aquí el papel de un GGSN para GSM/GPRS y WCDMA/HSPA. Debido a la arquitectura plana, éste nodo debe ser capaz de conectarse esencialmente a cada eNB en la red, y actualizarse dentro del mismo, que deberá guiar los paquetes del usuario. Ésta es la gran diferencia en comparación con la RAN WCDMA/HSPA, donde el RNC esconde éste tipo de movilidad desde el núcleo de red.

Tres son las entidades básicas para soportar la movilidad: la MME (*Mobility Management Entity*), el S-GW (*Serving-Gateway*) y el PDN-GW (*Packet Data Network-Gateway*). Por medio de la interfaz S1, éstos se interconectan con la

RAN. Dicha interfaz consta del plano de control S1-mme, entre el eNB y el MME, y del plano de usuario S1-u, entre el eNB y el S-GW. [20]

3.3.1 Interfaz de Red Troncal EPC

Conecta a la entidad P-GW del EPC con las redes externas de IP como internet. Sirve para conectar a las redes de datos externas (IMS o Internet) con la P-GW. Transporta datos tanto en protocolos IPv4 como en IPv6. La SGi es la interfaz equivalente a la interfaz Gi para las redes 2G/3G.

3.3.2 Bearers usados por la red LTE

En la Ilustración 14 se aprecian todos los servicios Bearers usados por LTE y los elementos o entidades a los que está asociado cada uno. [21]

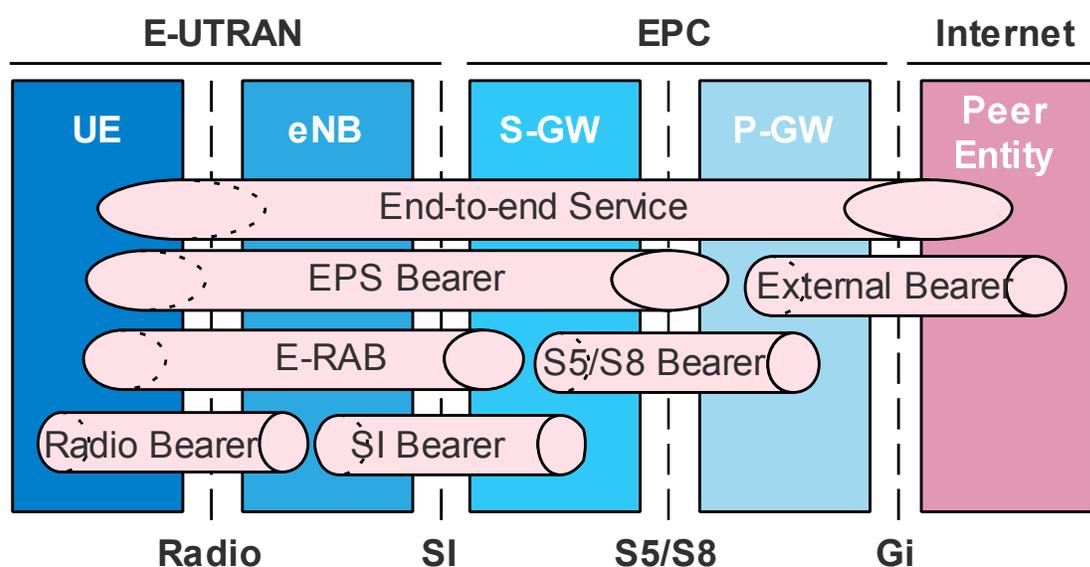


Ilustración 14: Bearers usados por LTE

La segunda categoría se basa en el empleo de una tasa de bits garantizada, así tenemos a los GBR **XDUDQWHHG %LW 5DWH* bearers, que se asocian a una tasa de bits garantizada, que es una tasa de datos promedio a largo plazo que el UE puede esperar tener. Son apropiados para servicios en tiempo real como llamadas de voz. Por otro lado se tienen los Non GBR bearer, o bearer de tasa no garantizada, que como su nombre lo indica no asegura una tasa de datos por lo que varía de un momento a otro durante la conexión. [21]

Los Non GBR bearers son apropiados para aplicaciones navegación web.

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

La aplicación de una calidad de servicio a un flujo de datos depende en gran parte del tipo de suscripción que tenga el usuario y del tipo de aplicación que se esté ejecutando en un determinado momento. Para llevar este proceso a cabo, el operador de la red puede ofrecer distintos planes de servicios de acuerdo a las necesidades de cada tipo de usuario. Por ejemplo el plan de servicios “Gold”, tendrá las más altas prestaciones en cuanto a prioridad de asignación de recursos y velocidad por lo que sería el más costoso mientras que un servicio “Bronze”, puede ser el plan más básico con algunas deficiencias y por lo tanto el más barato. [20]

3.3.3 Tipo de EPS Bearer

Esto es, si se trata de bearers que manejan tasas de datos garantizadas o no garantizadas:

Guaranteed Bit Rate Bearer (GBR-Bearer): Este tipo de bearer tiene asociados dos valores; la tasa mínima garantizada y la tasa máxima garantizada. La primera, como su nombre lo indica, nos avisa de la tasa mínima que puede esperar un UE y que nunca será inferior a ese valor. [9] Por el contrario, la tasa máxima garantizada es un promedio de los valores pico de las tasas de transmisión más altas que se pueden alcanzar y que delimita un servicio. Es útil para aplicaciones que requieren un flujo continuo de datos.

Non Guaranteed Bit Rate Bearer (Non-GBR Bearer): Este tipo de bearer no ofrece garantía alguna para las tasas de transmisión por lo que durante un enlace la tasa varía, en algunos instantes será alta y en otros baja. Este tipo de bearer es útil para la transmisión a ráfagas. [3]

QoS Class Identifier (QCI): Es un valor escalar que indica una prioridad, un retraso máximo y una tasa de bits en error permitida. También de acuerdo a su

valor indica si se trata de un GBR Bearer o de un Non-GBR Bearer. Un valor bajo indica una prioridad alta por lo que en una red congestionada los paquetes con que tengan un QCI de valor N , serán procesados antes que los paquetes con un QCI de valor $N+1$.

ARP (Allocation and Retention Priority): Usado para el control de admisión, es decir funciona para decidir que bearer se activa, desactiva o modifica primero en la red en caso de congestión. Es un valor entero entre 1 y 16.

Los parámetros mencionados se concentran en la Tabla 2, donde se tienen los distintos valores de QCI asociados a cada tipo de bearer, la tasa de bit en error máxima para cada bearer y retraso admisible para cada valor de QCI, así como también ejemplos de las aplicaciones que se podrían ejecutar en un UE. [3]

Tabla 2: Campos del QCI para QoS en LTE

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

Los GBR Bearers son útiles para aplicaciones que requieren un flujo continuo de datos donde se asegure una tasa de transmisión para tener una mínima pérdida de paquetes, tal es el caso de las llamadas de voz y de video, aplicaciones que son muy sensibles a retrasos. [9]

3.3.4 Interfaz LTE Uu

Esta interfaz es conocida también como interfaz de aire o interfaz de radio. Mediante esta interfaz se transmiten paquetes IP de control, señalización e información entre el UE y su respectivo eNodeB. [21]

Por este medio se realiza el paging y se envía información específica para el control de las redes de acceso y troncal, por ejemplo, los valores de potencia máxima de transmisión.

La interfaz de radio utiliza una torre de protocolos para la transmisión de datos, la misma que se encuentra dividida en una capa de enlace y una capa física tanto para el plano de usuario como para el plano de control, tal como se indica en la Ilustración 15. [20]

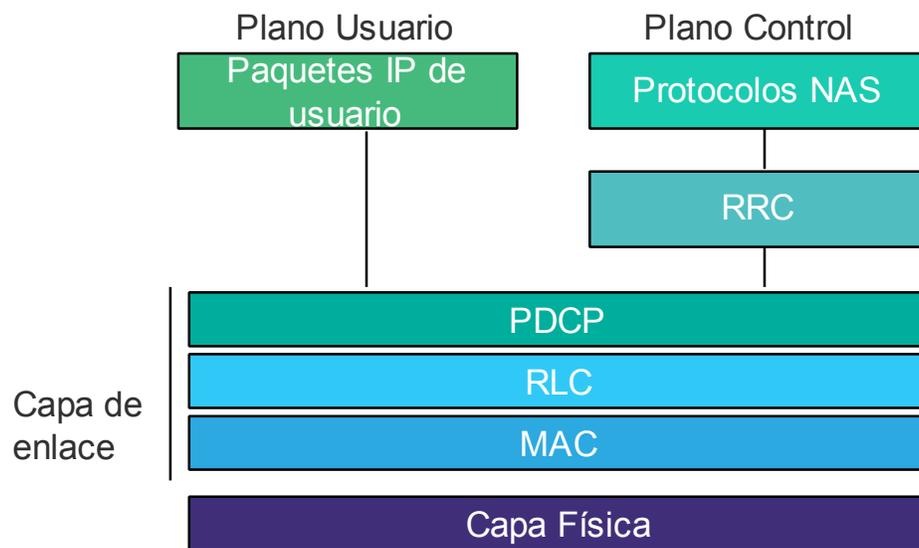


Ilustración 15: Capa Enlace

La capa de enlace se encuentra dividida en varias subcapas, las cuales son:

PDCP (Packet Data Convergence Protocol, Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos): Esta capa es la encargada de comprimir las cabeceras de los paquetes IP y de cifrar los mismos para mantener la integridad de la información. Además agrega bits a la cabecera que indican la secuencia de los paquetes.

RLC (Radio Link Control, Control del Enlace Radio): Esta subcapa se encarga de corregir errores de las tramas mediante ARQ (Automatic Repeat Request), además de ordenarlas y reensamblarlas para entregar a la capa PDCP. [18]

MAC (Medium Access Control, Control de Acceso al Medio): Las funciones de esta subcapa son las de multiplexar los diferentes paquetes que provienen de la

capa RLC para enviarlas por la capa física a los diferentes usuarios mediante canales lógicos.

Por otro lado, la capa física es la encargada de gestionar el canal de transmisión. En esta capa se encuentran las características de modulación de la señal junto con las técnicas MIMO. [9]

En el plano de control se encuentra la capa RRC (Radio Resource Control, Control de Recursos Radio), la cual es la encargada del control y gestión de la interfaz de radio, soporta las funciones de manejo de recursos de asignación de portadoras para los usuarios, control de handover, broadcasting, entre otros. Para esto se vale del protocolo NAS (Network Attached Storage, Almacenamiento Adjunto en Red) de almacenamiento de datos correspondientes a cada usuario. [20]

Interfaz S5-S8: Interconecta las entidades P-GW y S-GW. La diferencia entre la interfaz S5 y S8 radica en que la primera sirve para comunicar a entidades dentro de una misma red, mientras que la S8 comunica a entidades de diferentes redes. Los protocolos de esta interfaz son: GTP/UDP/IP.

Interfaz S11: Es la encargada de la comunicación entre las entidades MME y S-GW. Mediante esta interfaz se transporta información de señalización dirigida hacia los usuarios. En el caso de handover, la MME controla la transferencia de paquetes de las S-GWs involucradas mediante esta interfaz. Los protocolos involucrados son: GTP/UDP/IP.

Interfaz S10: Esta interfaz relaciona a dos entidades MME. Se utiliza para transferir información de usuarios que realizan handovers entre MMEs. Contiene la información de seguridad de usuario, gestión de movilidad y servicios portadores. Los protocolos utilizados son: GTP/UDP/IP. [21]

3.3.5 Latencia de la interfaz aire

La interfaz aire se refiere a la conexión radio entre el UE y la estación base. Aquí es importante una comunicación de baja latencia, no sólo por la experiencia del usuario, sino que también para mejorar el rendimiento de los mecanismos de control de lazo cerrado (*closed-loop*). Hay muchos de estos mecanismos en LTE,

incluyendo el control de potencia del enlace ascendente, HARQ, programación de frecuencia selectiva y MIMO *Closed-Loop*. En todos ellos, las mediciones realizadas en el receptor son reportadas de vuelta al transmisor, de modo que se puede adaptar de alguna manera para mejorar el rendimiento en la conexión radio. La baja latencia *feedback* es importante para garantizar las medidas que siguen siendo válidas en el momento en que se puede adaptar el transmisor. Esto se vuelve más importante a altas velocidades de usuario donde las condiciones radio cambian rápidamente. [21]

La latencia en la interfaz aire de LTE, es una importante mejora con respecto a los sistemas anteriores, y ya se ha logrado mediante el rediseño de la interfaz con un corto intervalo de tiempo de transmisión de 1 ms. Este intervalo es el bloque más corto de la señal, que debe ser recibido en su totalidad antes de que pueda ser decodificado. El actual requisito de la latencia en la interfaz aire es de 10 ms ida y vuelta, también se tiene en cuenta el tiempo de procesamiento para codificar y decodificar las transmisiones en cada extremo. [9]

Interfaz S11: Utilizada para comunicación de plano de control vía túnel GTP entre el S-GW y el MME durante un proceso de inter-eNodeB handover para transferir los canales bearer de datos, y durante actualización del área de tracking. Utiliza el protocolo de aplicación GTP-C. [21]

3.4 Interfaces

La comunicación entre los diversos elementos de red se realiza por medio de interfaces y protocolos específicos para cada una de ellos. Las interfaces principales en una red LTE son:

- Interfaz de radio / aire (entre el eNodeB y el terminal móvil)
- Interfaz S1 (entre E-UTRAN y EPC)
- Interfaz X2 (entre eNodeBs)
- Interfaz S5 (entre S-GW y P-GW)
- Interfaz S6a (entre MME y HSS) [12]
-

Interface de radio Uu: Es la interfaz de aire, especificada por la 3GPP como interfaz LTE-Uu. Esta interfaz comunica al eNodeB con el terminal móvil o UE (User Equipment). A través de la interfaz aire se manejan los planos de control y de usuario. En el plano de control se maneja señalización por medio de mensajes de RRC (Radio Resource Control). En el plano de usuario, la interfaz facilita la comunicación directa del móvil UE hasta el EPC.

Interfaz X2: Es la interfaz entre dos eNodeBs, realiza funciones de transferencia de datos de usuario, información de control durante procesos de handover, así como transferencia de datos IP almacenados en un eNB hacia un nuevo eNB al que un UE se ha conectado después de un handover.

El plano de control trabaja con el protocolo X2-AP, y transmite señalización de handover y de administración de recursos de radio, RRM. En el plano de usuario, se crea un túnel GTP a través de la X2, por medio del protocolo GTP-U, para comunicar los datos de usuario entre el eNodeB origen y el eNodeB destino. [12]

Los protocolos de la interfaz X2 son los mismos que se utilizaron en el plano de usuario de la interfaz S1 (S1-U), con la única diferencia de que en la capa RNL el protocolo S1-AP es remplazado por el protocolo X2-AP (ver Ilustración 16). [9]

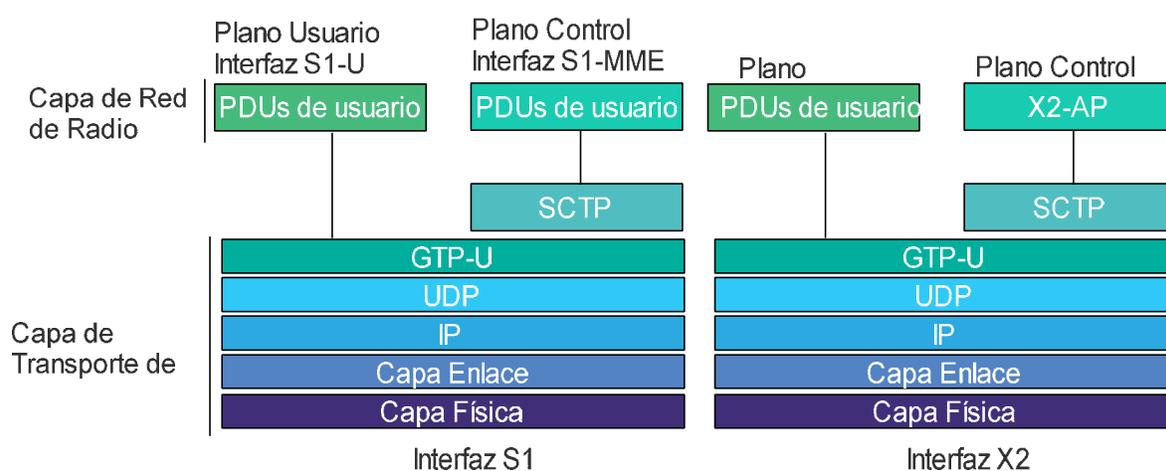


Ilustración 16: Interfaz S1-X2

El protocolo X2-AP transporta datos utilizados para la gestión de movilidad, manejo de carga, informe de situaciones de error, configuración de actualizaciones y ahorro de energía para operar correctamente con otros eNodeBs. [3]

Interface S5: La comunicación de usuario entre el SGW y el P-GW se realiza a través de esta interfaz, por medio de un túnel GTP. Ciertas soluciones de elementos de red, integran en un solo elemento las entidades de SGW y P-GW en un único nodo SAE-GW, en cuyo caso esta interfaz se convierte en una interfaz interna.

Interfaz S6a: Permite realizar funciones propias de gestión de usuarios que incluyen localización, autenticación, identificación, perfil de suscripción tanto de usuarios de la red como de otras redes. El protocolo que maneja esta interfaz es el Diameter, el cual es considerado como el protocolo de evolución del RADIUS que complementa las funciones establecidas para AAA (Authentication, Authorization, Accounting).

Comunica la base de datos de suscriptores HSS (Home Subscriber Server) con la entidad de administración de movilidad (MME). La interfaz utiliza el protocolo Diameter para transferencia de datos de suscripción y autenticación de usuarios. El HSS adicionalmente registra la ubicación del usuario a nivel de área de tracking. [20]

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

- Señalización de control: contiene información sobre la cobertura del eNB, la potencia del eNB, la sensibilidad del eNB y establecimiento de una conexión de control entre un UE y el eNB con el fin de tener un registro del UE y la información de usuario asociada.

- Paquetes de IP: el eNB recibe y envía tráfico de IP a los usuarios.

- Señalización dedicada: información que se intercambia entre un UE y el eNB para identificar y dar de alta a un UE, sirve para gestionar los *Radio*

Bearers, además de proporcionar la señalización para que un UE acceda al EPC. [15]

Interfaz S1: Conecta al eNB con la red troncal EPC. Usa como protocolo de transporte GTP (*GPRS Tunneling Protocol*), realiza un mapeo entre los S1 bearers y los S5/S8 bearers, asociando a cada pareja un túnel bidireccional:

Interfaz S1-MME: Conecta al eNB con la entidad MME del EPC y es la encargada de las funciones de control y señalización.

Las funciones básicas que se establecen en esta interfaz son las de enviar mensajes de control al eNodeB, que posteriormente serán reenviados al usuario, y de transmitir las señales de gestión de localización de los usuarios en una celda, los paquetes de paging y los avisos de handover, es decir, todos estos servicios gestionados por la MME.

Al igual que la interfaz S1-U, está también está compuesta por las capas RNL y TNL.

En la capa RNL se encuentra el protocolo S1-AP que soporta todas las funciones iniciadas por la MME (paging, handover, localización, etc.). Mientras que en la capa TNL se tiene el protocolo SCTP que cumple con las mismas funciones que los protocolos GTP-U y UDP. [18]

El SCTP (Stream Control Transmission Protocol, Protocolo de Transmisión del Control de la Corriente), un protocolo de transporte que hereda características de TCP, incorpora a su vez características adicionales como multi-stream y multihoming, que dan mayor robustez a los paquetes transportados. Adicionalmente, estos paquetes se basan en mensajes y no en estructuras de bytes como lo hacía TCP. [15]

Interfaz S1-U: Esta interfaz se encuentra en el plano de usuario y sirve para comunicar a los eNodeBs con la S-GW. Además es utilizada como una pasarela de conmutación durante el handover entre eNodeBs.

Es usada para el envío de tráfico de usuario entre un UE y el EPC. La interfaz S1-U es gestionada por la interfaz S1-MME.

El servicio de transmisión de información entre el eNB y el EPC se denomina S1-Bearer.

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

Los protocolos de esta interfaz se encuentran divididos en dos capas: RNL (Radio Network Layer, Capa de Red de Radio o acceso) y la TNL (Transport Network Layer, Capa de Transporte de Red). [21]

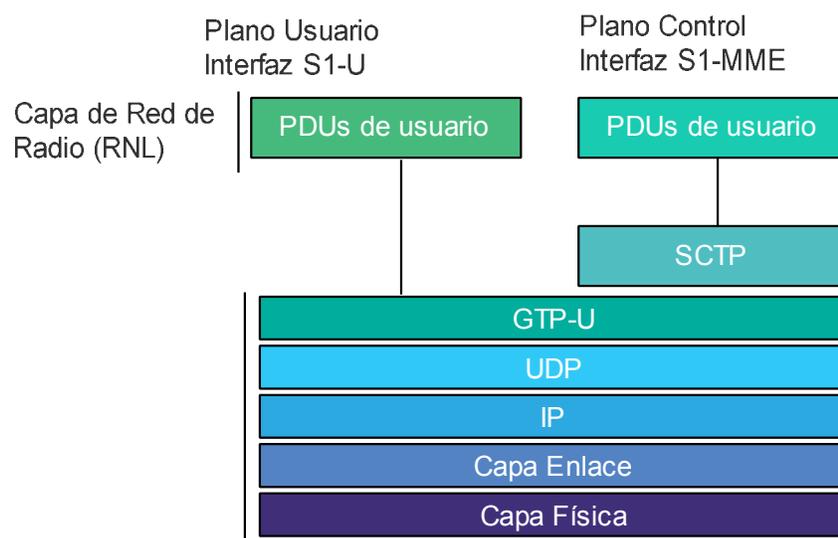


Ilustración 17: Interfaz S1

En la capa RNL se encuentra el protocolo PDU de usuario. Este se encarga de gestionar los recursos de comunicación de la red de acceso.

Los protocolos utilizados en la capa TNL son: GTP-U, UDP e IP.

GTP: El protocolo GTP-U está basado en túnel sobre GPRS. Se encarga de facilitar la movilidad dentro de las redes 3GPP. Este protocolo encapsula e incluye en la cabecera de cada paquete IP el identificador del túnel por el cual va a pasar, su longitud y el número de secuencia. [12]

UDP/IP: Este protocolo envía los paquetes como datagramas sobre redes IP de manera directa. Trabaja sin conexión, por lo tanto no existe ningún tipo de control ni de detección de errores en los paquetes que llegan por la capa física.

3.5 Técnicas de acceso al medio

En la siguiente sección, se describen las técnicas que utiliza LTE para el control de acceso al medio, explicando principalmente como trabaja el enlace ascendente y el enlace descendente de acuerdo a los tipos de interfaz de aire que ocupa LTE. [18]

Algunos de los estándares fundamentales para 4G son WiMAX, WiBro, y 3GPP LTE. Para poder hacer realidad esta red es necesario no sólo integrar las tecnologías existentes (2G, 3G...), también es necesario hacer uso de nuevos esquemas de modulación o sistemas de antenas que permitan la convergencia de los sistemas inalámbricos.

Los componentes fundamentales de una red 4G son:

- Sistemas Multiantena (MIMO).
- SDR (Software Define Radio).
- Sistemas de acceso existentes como TDMA, FDMA, CDMA y sus posibles combinaciones son fundamentales en sistemas 3G y también lo son los sistemas ya empleados en los estándares 802.11 (Wi-Fi), 802.16a (WiMAX) y 802.20 (MBWA) como son OFDMA, MC-CDMA y Single Carrier FDMA.
- Estándar IPv6 para soportar gran número de dispositivos inalámbricos, y asegurar una mejor calidad de servicio además de un enrutamiento óptimo. [17]

3.6 Funcionamiento de descarga y subida de datos

LTE emplea la banda de los 700 MHz, aprovechando que ha quedado liberada tras el apagón de la televisión analógica, para lograr mejor cobertura y penetración en los edificios, algo imprescindible para las operadoras que lo comercialicen. [9]

En el funcionamiento de la tecnología LTE podemos diferenciar entre su funcionamiento en el canal de descarga de datos y en el canal de subida de datos:

En la descarga con LTE se emplea una modulación OFDMA (acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal). Las subportadoras se modulan con un rango de símbolos QPSK, 16QAM o 64QAM. Es muy fuerte contra los efectos de multipath, idónea para implementaciones MIMO o SFN.

La subida de archivos con LTE usa división de portadora simple de acceso múltiple (SC-FDMA) para simplificar el diseño y reducir picos de tasa media y consumo energético. [18]

Para OFDMA, los 4 símbolos se toman en paralelo, cada uno de ellos modulando su propia sub-portadora en la fase QPSK apropiada. Después de un período de símbolo OFDMA, se deja un tiempo (para que no haya solapamientos) antes del siguiente período de símbolo.

En SC-FDMA, cada símbolo se transmite secuencialmente. Así, los 4 símbolos se transmiten en el mismo período de tiempo. El rango de símbolos más alto requiere de cuatro veces el ancho de banda del espectro. Después de cuatro símbolos se deja el tiempo para evitar solapamientos mencionado anteriormente. [17]

CAPÍTULO 4: SISTEMAS DE TRANSMISIÓN

4.1 OFDM.

OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) ha sido aprobado como el sistema de transmisión de enlace descendente del 3GPP LTE y también se utiliza para otras tecnologías como WiMAX y DVB *broadcast*. La transmisión por medio de OFDM puede ser apreciada como una especie de transmisión multi-portadora. Las características básicas de la transmisión de OFDM son:

- El uso de un número relativamente grande de subportadoras de banda estrecha, es decir, una simple multi-portadora consistirá en pocas subportadoras, cada una con un relativo ancho de banda. Por ejemplo, una multi-portadora WCDMA con 20 MHz de ancho de banda, podría consistir en cuatro subportadoras, cada una con un ancho de banda en el orden de los 5 MHz. En comparación con los otros sistemas, la transmisión OFDM puede implicar que varios cientos de subportadoras se transmiten en el mismo enlace de radio al mismo receptor.

- Posee un simple pulso rectangular en el dominio del tiempo configurado. Esto corresponde a una forma de función sinc en el dominio de frecuencia.

- El compacto dominio de frecuencia de las subportadoras con una desviación $\Delta f = 1/T_u$, donde T_u es el tiempo de la modulación del símbolo por subportadora. [17]

El número de subportadoras OFDM puede variar desde menos de cien a varios miles, con una desviación de subportadoras que van desde cientos de KHz a unos pocos KHz. La desviación de subportadora a utilizar depende de los tipos de ambientes en el que va a operar el sistema, incluyendo tales aspectos como el máximo esperado de selectividad de frecuencia del radio canal (máximo esperado del tiempo de dispersión) y el máximo de velocidad de transmisión de variación canal (máximo esperado de propagación Doppler).

Para LTE la básica desviación es igual a 15 KHz. Por otra parte, el número de subportadoras depende del ancho de banda de transmisión, en el orden de 600 subportadoras en caso de operación en un espectro asignado de 10 MHz, y

menos o más subportadoras en el caso de los pequeños o grandes anchos de banda de transmisión respectivamente. [13]

Entonces, este sistema de transmisión en el enlace descendente, es atractivo por varias razones. Debido a la correspondiente longitud de tiempo del símbolo OFDM en combinación con un prefijo cíclico, OFDM proporciona un alto grado de robustez frente al canal selectivo de frecuencia. Aunque hay corrupción de la señal, este puede ser manejado en un principio por medio de la igualación en el lado receptor, la complejidad de esto se torna algo desagradable para la implementación en un terminal móvil de un ancho de banda por encima de los 5MHz. Además OFDM es óptimo para el enlace descendente, especialmente cuando se combina con multiplexación espacial.

Los beneficios adicionales de OFDM son:

- OFDM proporciona acceso de dominio de frecuencia, así se permite un adicional grado de libertad al canal dependiente comparado con HSPA.
- Flexibles asignaciones de ancho de banda son fácilmente respaldadas por OFDM, al menos desde una perspectiva de banda base por la variación de números de subportadoras que OFDM utiliza para su transmisión.
- Transmisión *broadcast/multicast*, donde la misma información es transmitida por múltiples estaciones base, que es sencillo con OFDM. [9]

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

LTE usa un espaciado fijo entre subportadoras de 15 KHz y son agrupadas en conjuntos de 12 subportadoras. Esto se lleva a la versión múltiple para dar lugar al método de acceso al medio que emplea LTE llamada OFDMA ya que todos los UEs comparten los recursos y les son asignados de forma dinámica. El

eNB transmite hacia los UEs en diferentes tiempos y frecuencias de antemano conociendo las necesidades de cada aplicación que solicitan los recursos. [12]

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

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

La Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM) consiste en varias portadoras espaciadas de tal forma que, a pesar de que sus espectros se cruzan, no causan interferencias unas en otras. Se pueden enviar varias ondas portadoras (múltiples señales) simultáneamente en frecuencias distintas, de esto nace la necesidad de una división de frecuencias.

Para la división del espectro, es necesario dejar un espacio antes y otro después de cada frecuencia portadora para que no haya interferencias entre ellas. A estos espacios se les llama bandas de guarda. [17]

La OFDM tiene a la FDM como principio. En la FDM los datos de un usuario se transmiten constantemente en una sola frecuencia, mientras que con la OFDM los datos se dividen y se transmiten continuamente por varias sub-portadoras de menor capacidad.

Las señales podrían interferir unas con otras si no se da una banda de guarda adecuada para cada frecuencia portadora que evite que se superpongan. La ortogonalidad de las frecuencias permite que estas bandas sean innecesarias. [20]

En la OFDM se crean sub-portadoras cuyas ondas se puedan superponer sin causar interferencias. Las frecuencias centrales son seleccionadas con una

diferencia de espacio específica que hace que las ondas portadoras tengan el valor de cero en las frecuencias centrales de las vecinas.

La ventaja que presenta la OFDM de reducir la complejidad computacional es la razón por la que 3GPP la escogió para ser implementada en LTE. Esto la convierte en la técnica preferida para implementar en sistemas de radio que necesitan tasas extremadamente altas de transferencia. [17]

4.2 OFDMA

OFDMA, que traducido significa Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales, es una elaboración de la OFDM utilizada por LTE y otros sistemas que incrementa la flexibilidad del acceso de los usuarios al sistema mediante la multiplexación de varios usuarios en las mismas subportadoras.

OFDMA es utilizado para el enlace descendente con el objetivo de contrarrestar la interferencia de multitrayectoria en el canal de radio y proveer una mayor eficiencia espectral ya que no se necesitan bandas de guarda. [9]

La técnica de acceso múltiple OFDMA que se utiliza en el enlace descendente en el sistema LTE ofrece la posibilidad de que los diferentes símbolos modulados sobre las subportadoras pertenezcan a usuarios distintos. Por tanto, es posible acomodar varias transmisiones simultáneas correspondientes a diferentes flujos de información al viajar en subportadoras diferentes.

Se consigue que un conjunto de usuarios puedan compartir el espectro de un cierto canal para aplicaciones de baja velocidad. El acceso múltiple se consigue dividiendo el canal en un conjunto de subportadoras que se reparten en grupos en función de la necesidad de cada uno de los usuarios. El sistema se realimenta con las condiciones del canal, adaptando continuamente el número de subportadoras asignadas al usuario en función de la velocidad que éste necesita y de las condiciones del canal. Si la asignación se hace rápidamente, se consigue cancelar de forma eficiente las interferencias co-canal y los desvanecimientos rápidos. [3]

Hay que destacar que no es necesario que las subportadoras estén contiguas, los símbolos de un usuario pueden estar distribuidos sobre subportadoras no contiguas. [9]

Las principales ventajas de utilizar OFDMA son las siguientes:

Diversidad multiusuario: La asignación de subportadoras se realiza de manera dinámica. Como el canal radio presentará desvanecimientos aleatorios en las diferentes subportadoras, y que serán independientes de cada usuario, se puede intentar seleccionar para cada subportadora el usuario que presente un mejor estado del canal, es decir, el que perciba una mejor relación señal a ruido. Con esto conseguiríamos una mayor velocidad de transmisión y una mayor eficiencia espectral. A esta manera de actuar se le denomina *scheduling*.

Diversidad frecuencial: Es posible asignar a un mismo usuario subportadoras no contiguas, separadas suficientemente como para que el estado del canal en las mismas sea independiente, lo que nos proporciona diversidad frecuencial en la transmisión de dicho usuario ante canales selectivos en frecuencia.

Robustez frente al multitrayecto: Gracias a la utilización del prefijo cíclico, esta técnica es muy robusta frente a la interferencia intersimbólica (ISI), resultante de la propagación multitrayecto y se puede combatir la distorsión mediante técnicas de equalización en el dominio de la frecuencia, que resultan menos complejas que las que se realizan en el dominio del tiempo.

Flexibilidad en la banda asignada: Esta técnica de acceso múltiple nos proporciona una forma sencilla de acomodar diferentes velocidades de transmisión a los diferentes usuarios en función de las necesidades de servicio requeridas por cada usuario, simplemente asignando más o menos subportadoras a cada usuario.

Elevada granularidad en los recursos asignables: Como estamos subdividiendo la banda total en un conjunto elevado de subportadoras de banda estrecha que se asignan dinámicamente a los usuarios, se dispone de una elevada granularidad a la hora de asignar más o menos recursos a cada uno, con lo que nos ayudará a acomodar servicios con diferentes requisitos de calidad.

Elevado grado de utilización de la banda asignada: Gracias a la utilización de la transmisión OFDM la transmisión multiportadora se consigue con una separación mínima entre subportadoras, existiendo una superposición.

Sencillez de implementación en dominio digital: Gracias al uso de la Transformada Rápida de Fourier (FFT e IFFT).

Las principales desventajas de utilizar OFDMA son las siguientes:

- Elevada relación entre la potencia instantánea y la potencia media (PAPR).
- Susceptibilidad frente a errores en frecuencia. [17]

4.3 SC-FDMA

Para el enlace ascendente, LTE se basa en la técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Simple.

Esta técnica es una variante de la OFDM con la diferencia de que permite un menor consumo de energía y el uso de amplificadores menos costosos en el terminal. [3]

Para el enlace ascendente de LTE, se ha seleccionado un tipo de transmisión con portadora única basado en DFT-*spread* OFDM (DFTS-OFDM), debido a la combinación de las propiedades tales como:

- Pequeñas variaciones en la potencia instantánea de la señal transmitida.
- Posibilidad de baja complejidad para una alta calidad de igualación en el dominio de frecuencia.
- Posibilidad de FDMA con asignación flexible de ancho de banda.

También, al igual que en OFDM, es preferible insertar un prefijo cíclico para cada bloque en la transmisión. La presencia de un prefijo cíclico permite una complejidad menor de igualdad del dominio de frecuencia en el lado receptor. El principal beneficio de DFT-OFDM, en comparación con una transmisión multiportadora OFDM, es que reduce las variaciones en la potencia de transmisión instantánea, lo que conlleva a la posibilidad de aumentar la eficiencia del amplificador de potencia.

SC-FDMA se basa en unos principios de transmisión muy similares a los de OFDM, pero en este caso se efectúa una precodificación de los símbolos que se van a transmitir previa al proceso de transmisión OFDM, lo que nos permitirá reducir las variaciones en la potencia instantánea.

Desafortunadamente OFDM tiene picos de potencia que en la estación base no representa un problema, pero es inaceptable para un móvil. Por eso LTE utiliza el esquema de modulación SC-FDMA para la comunicación del móvil a la estación base. Esta técnica combina los picos bajos que ofrecen los sistemas de portadora simple y la disminución de la interferencia por multitrayectoria que ofrece OFDM. [18]

4.4 MIMO

El sistema MIMO utiliza múltiples antenas tanto para recibir como para transmitir. Una transmisión de datos a tasa elevada se divide en múltiples tramas más reducidas. Cada una de ellas se modula y transmite a través de una antena diferente en un momento determinado, utilizando la misma frecuencia de canal que el resto de las antenas. Debido a las reflexiones por multitrayecto, en recepción la señal a la salida de cada antena es una combinación lineal de múltiples tramas de datos transmitidas por cada una de las antenas en que se transmitió.

Las tramas de datos se separan en el receptor usando algoritmos que se basan en estimaciones de todos los canales entre el transmisor y el receptor. Además de permitir que se multiplique la tasa de transmisión (al tener más antenas), el rango de alcance se incrementa al aprovechar la ventaja de disponer de antenas con diversidad. [17]

La teoría de la capacidad inalámbrica, extiende el límite del teorema de Shannon, en el caso de la utilización de esta tecnología. Este resultado teórico prueba que la capacidad de transmisión de datos y rango de alcance de los sistemas inalámbricos MIMO se puede incrementar sin usar más espectro de frecuencias. Este aumento es de carácter indefinido, simplemente utilizando más antenas en transmisión y recepción. MIMO requiere la existencia de un número

de antenas idéntico a ambos lados de la transmisión, por lo que en caso de que no sea así, la mejora será proporcional al número de antenas del extremo que menos antenas tenga. [9]

LTE desde un comienzo posee la característica de ser compatible con el soporte de múltiples antenas tanto en la estación base y en el terminal como una parte integral de las especificaciones. El uso de múltiples antenas es la tecnología clave para llegar a los objetivos más competitivos en el rendimiento de LTE y se utilizan de diferentes maneras:

- La múltiple recepción de antenas se puede utilizar de manera diversa. Para las transmisiones del enlace ascendente, ésta se ha utilizado en muchos sistemas celulares durante varios años. Sin embargo, como la recepción con doble antena es la línea de referencia para todos los terminales LTE, el rendimiento del enlace descendente también es mejor aprovechado. La forma más sencilla de usar este sistema es la diversa recepción clásica para reprimir el desvanecimiento, pero los beneficios adicionales pueden lograrse en escenarios de interferencia limitada si las antenas también se utilizan no sólo para ofrecer la diversidad contra éste, sino que también para suprimir las interferencias.

- La transmisión de múltiples antenas a la estación base, se puede utilizar para transmitir diversos y diferentes tipos de *beamforming*. El principal objetivo del *beamforming* es el de mejorar la recepción SNR, y eventualmente mejorar la capacidad del sistema y la cobertura.

- El multiplexado espacial (*Spatial Multiplexing*), referido al sistema MIMO, utilizando múltiples antenas tanto en el transmisor y el receptor, es el apoyo a LTE que da lugar a una mayor velocidad de transmisión de datos, permitiendo las condiciones del canal, en escenarios de ancho de banda limitado para la creación de varios canales paralelos. [18]

Como alternativa o complemento a la recepción con múltiples antenas, la diversidad y al *beamforming* puede también ser logrado mediante la aplicación de múltiples antenas en el lado del receptor. El uso de estas antenas para transmitir es principalmente importante para el enlace descendente, es decir, en la estación base. En este caso, el uso de múltiples antenas para transmitir proporciona una

oportunidad sin la necesidad de agregar antenas receptoras y una correspondiente recepción en cadena al terminal móvil. Por otra parte, debido a razones de complejidad del uso de múltiples antenas para transmitir en el enlace ascendente, es decir, en el terminal móvil, es menos atractivo. En este caso, normalmente es preferible aplicar adicionales antenas de recepción y correspondientes reacciones en la recepción de la estación base. [3]

En general, las diferentes técnicas de múltiples antenas son beneficiosas en distintas situaciones. Por ejemplo en la baja relación de SNR y SIR (relación señal a interferencia), MIMO proporciona beneficios relativamente limitados. En cambio, en tales escenarios de múltiples antenas en el lado transmisor debe ser usado para aumentar la relación SNR/SIR por medio del *beamforming*. Por otra parte, en escenarios donde la relación de SNR y SIR es alta, por ejemplo, en pequeñas celdas, aumentando la calidad de la señal que proporciona, además ganancias relativamente menores como la factible velocidad de transmisión de datos, son principalmente limitados en el ancho de banda en lugar de SNR/SIR. A causa de estas situaciones, el multiplexado espacial debe ser utilizado en lugar de aprovechar plenamente las buenas condiciones del canal. El sistema de múltiples antenas usado está bajo el control de la estación base, por lo que se puede seleccionar un plan adecuado para cada transmisión. [17]

CAPÍTULO 5: PROGRAMACIÓN DEL CANAL Y ADAPTACIÓN DE LA VELOCIDAD DE DATOS

El corazón del sistema de transmisión de LTE, es el uso de transmisión de canales compartidos, el que está bien adaptado a las diferentes necesidades de recursos planteados por los paquetes de datos y también posibilita varias de las otras tecnologías claves utilizadas por LTE. [22]

La programación (*scheduling*) de controles, en cada instante de tiempo, debería ser asignado para aquellos usuarios que comparten recursos. Esto también determina la velocidad de transmisión de datos que se utilizará para cada enlace, velocidad de transmisión adaptada que puede ser vista como una parte de la programación. La programación es un elemento clave y en gran medida determina el rendimiento global del enlace descendente, especialmente en una red muy cargada. Ambas transmisiones de enlace ascendente y descendente están sujetas a una ajustada programación. En relación con HSPA, la programación enlace descendente transmite a un usuario cuando las condiciones del canal tienen la ventaja de aprovechar al máximo la velocidad de transmisión de datos, y es en cierta medida posible el *Enhanced Uplink* (enlace ascendente mejorado), sin embargo, como LTE posee dominio del tiempo y también acceso al dominio de frecuencia, debido al uso de OFDM y SC-FDMA en sus respectivos enlaces. El programador (*scheduler*) para cada frecuencia regional, puede seleccionar el canal de usuario con las mejores condiciones. [9]

El canal de programación se basa en las variaciones de la calidad del canal que hay entre los usuarios para obtener una ganancia en la capacidad del sistema. Para servicios sensibles al retraso (*delay*), una programación con dominio sólo en el tiempo puede ser realizada para un usuario en particular, a pesar de que la calidad del canal no está en todo su auge. En situaciones como ésta, la explotación de las variaciones de la calidad del canal también en el dominio de la frecuencia ayudará a mejorar el rendimiento global del sistema. En LTE, las decisiones de programación pueden tomarse tan a menudo como una vez cada 1 ms y la granularidad en el dominio de la frecuencia es 180 KHz. [22]

5.1 Programación del enlace descendente

Inicialmente se asume un enlace descendente basado en TDM con un único usuario programado en un momento. En este caso, la utilización de los recursos radio se maximiza si en cada instante de tiempo, todos los recursos se asignan al usuario con la mejor condición instantánea del canal:

- En el caso de la adaptación del enlace basado en el control de potencia, implica que la menor potencia posible transmitida puede ser utilizada para una determinada tasa de datos y así se minimiza la interferencia de las transmisiones en otras células de un determinado enlace.

- En el caso de la adaptación del enlace basado en el control de velocidad, implica que los más altos valores de velocidad de transmisión de datos son logrados para una determinada potencia transmitida o para una determinada interferencia en las otras celdas. [9]

Sin embargo, si es aplicado al enlace descendente, el control de la potencia transmitida en combinación con la programación TDM, implica que el total disponible de las celdas que transmitirán potencia, no se utilizó en su totalidad. Así, el control de velocidad de datos es generalmente preferido.

Para facilitar la implementación de los mecanismos físicos necesarios para realizar la demodulación de las señales OFDMA propias del enlace descendente, se han establecido un conjunto de señales de referencia y sincronización además de un conjunto de canales de tráfico y control. [18]

Señales de Referencia (RS): Las señales de referencia o símbolos piloto se utilizan para:

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

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

- P-SCH (*Primary SCH*) que permite la sincronización temporal a nivel de subtrama, mediante procedimientos de correlación entre la señal recibida y una secuencia de referencia almacenada en el receptor.
- S-SCH (*Secondary SCH*) que posibilita la sincronización temporal a nivel de trama, utilizando la misma metodología de correlación temporal. [9]

5.2 Canales físicos de tráfico

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

Physical Multicast Channel (PMCH): El PMCH se utiliza para transportar información MBMS (*Multimedia Broadcast and Multicast System*) empleado cuando se ejecutan servicios de multicast. [3]

5.3 Canales físicos de control

Physical Broadcast Channel (PBCH): Transporta información básica sobre el sistema como el ancho de banda del canal, el tipo de duplexaje empleado, número de identificación de trama, etc.

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

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

Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH): En él va información sobre reconocimiento ACK (Acknowledged)/NACK para el mecanismo HARQ, cada uno de estos canales puede llevar información de este tipo de hasta 8 usuarios. [3]

5.4 Canales de transporte de enlace descendente

BCH (Broadcast channel): Empleado para el envío de información del eNB a los UE que contiene los parámetros básicos del sistema y para identificar al operador.

Downlink Shared Channel (DL-SCH): Maneja tanto información de datos de usuario como de señalización y es el canal principal por donde fluye la información de usuario desde el eNB hacia el UE.

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

Multicast Channel (MCH): Usado para dar soporte al servicio MBMS y lleva información referente a los datos de usuario que tienen en ejecución el servicio MBMS. [3]

5.6 Programación del enlace ascendente

Principalmente los recursos de potencia del enlace ascendente se distribuyen entre los usuarios, mientras que en el enlace descendente los recursos se centralizan en la estación base. Además la máxima potencia de transmisión de enlace ascendente de un solo terminal, suele ser típicamente inferior a la potencia de salida de una estación base, lo que genera un significativo impacto en la estrategia de programación. A diferencia del enlace descendente, donde a menudo se puede utilizar TDMA, normalmente la programación enlace ascendente es compartida entre la frecuencia y/o dominio de código adicionando al dominio del tiempo como un solo terminal no teniendo la suficiente potencia para utilizar eficientemente la capacidad de enlace. [15]

El enlace ascendente de LTE se basa en la separación ortogonal de usuarios, y ésta es la labor del programador del enlace ascendente para asignar recursos en ambos dominios, de tiempo y de frecuencia (TDMA/FDMA combinados) para los diferentes usuarios. Las decisiones de configuración son muy importantes, el estudio por medio de 1 ms, el control de los terminales móviles que están autorizados a transmitir dentro de una celda durante un

determinado intervalo de tiempo, también se debe tomar en cuenta en qué frecuencia la transmisión tiene lugar, y qué tipo de enlace ascendente de datos (formato de transporte) se utilizará. Hay que tener presente que sólo una región de frecuencias contiguas pueden ser asignados a los terminales en el enlace ascendente como consecuencia de la utilización de una portadora simple en la transmisión del enlace ascendente de LTE.

Las condiciones del canal se pueden tomar en cuenta también en el proceso de programación del enlace ascendente, similar a la programación del enlace descendente. Sin embargo, la obtención de información acerca de las condiciones del canal de enlace ascendente es una tarea no trivial, por lo tanto, diferentes medios para obtener la diversidad en un enlace ascendente son importantes como un complemento en los casos donde la programación del canal sometido al enlace ascendente no es utilizada. [22]

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

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

5.7 Canales de control

Physical Uplink Control Channel (PUCCH): Entre la información que transporta se destaca; las peticiones de recursos, reconocimiento ACK/NACK de enlace ascendente, información sobre el CQI. Está ubicado en los extremos de la banda del sistema.

Physical Random Access Channel (PRACH): El canal físico de acceso aleatorio consta de un prefijo cíclico y un preámbulo, y de esta manera iniciar, por parte del móvil, el procedimiento de conexión al sistema. [3]

5.8 Señales de Referencia (SR) en el enlace ascendente

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

- Señales DM-RS: empeladas para la detección y demodulación en el enlace ascendente, se ubican en la zona destinada el PUSCH.
- Señales SRS: usadas para conocer el comportamiento del canal en el dominio de la frecuencia y facilitar los algoritmos de gestión de recursos. [13]

5.9 Canales de transporte de enlace ascendente

Uplink Shared Channel (UL-SCH): Canal principal que se encarga del envío de datos de usuario desde el UE hacia el eNB en el enlace ascendente.

Random Access Channel (RACH): Se usa para enviar peticiones de acceso a la red y mensajes cortos de señalización.

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

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

El tamaño de los encabezados de las subcapas RLC y MAC puede variar de acuerdo a varios parámetros como la longitud de SN (*Sequential Number*) de paquete, el modo de operación de la subcapa RLC, etc. [3]

5.10 Interferencia Inter-Celda

LTE ofrece ortogonalidad entre los usuarios dentro de una celda en ambos enlaces, ascendente y descendente. Así, el desempeño de LTE en términos de eficiencia del espectro y las disponibles velocidades de transmisión de datos, es más limitada por la interferencia de otras celdas en comparación con WCDMA/HSPA. Los medios para reducir o controlar la interferencia entre celdas pueden, potencialmente proporcionar importantes beneficios al rendimiento de

LTE, especialmente en términos del servicio, como las velocidades de datos, que pueden ser ofrecidos a los usuarios en el borde de la celda. [12]

La coordinación de la interferencia inter-celda es una estrategia de configuración en donde las velocidades de transmisión de datos en el borde de la celda son incrementadas mediante la adopción considerada de interferencia entre celdas. Básicamente, la coordinación de la interferencia implica ciertas restricciones en el dominio de frecuencia para las configuraciones de ambos enlaces en una celda y para el control de la interferencia entre celdas. La transmisión de potencia es restringida en partes del espectro en una celda, la interferencia vista en las celdas cercanas en esta parte del espectro se reduce. Esta parte del espectro puede ser utilizado para proporcionar mayores velocidades de transmisión para los usuarios de la celda cercana o vecina. En esencia, el factor de reutilización de frecuencias es diferente en distintas partes de la celda. [9]

5.11 Esquema de Retransmisiones Selectivas

El tipo de esquema para retransmisiones selectivas llamado *Hybrid ARQ* (HARQ) con rápida combinación, es el utilizado en LTE. El HARQ es la combinación de códigos de corrección de errores (FEC) con un enfoque para manejar los errores de retransmisión llamado ARQ, utilizado prácticamente en todos los modernos sistemas de comunicación. En un esquema ARQ, el receptor utiliza un código de error de detección, normalmente un control de redundancia cíclica (CRC), para detectar si el paquete es recibido en error o no. El HARQ utiliza el código de corrección de errores para corregir un subconjunto de todos aquellos errores y se basa en la detección de errores para detectar errores incorregibles. Los paquetes recibidos erróneamente se descartan y el receptor solicita la retransmisión de paquetes dañados. Sin embargo, a pesar de que el paquete no ha sido posible descodificar, la señal recibida aún contiene la información, la cual es perdida por la eliminación de los paquetes recibidos erróneamente. Esta deficiencia está manejada por el sistema HARQ con rápida combinación. En el HARQ, los paquetes recibidos con error se almacenan en una

memoria, y más tarde son combinados con la retransmisión para obtener una sola combinación de paquetes que es más fiable que sus elementales. [12]

Por muchas razones similares que en HSPA, LTE utiliza este sistema para permitirle al terminal una rápida solicitud de las retransmisiones, por la recepción errónea del transporte y por el hecho de proporcionar una herramienta para la adaptación de la velocidad de transmisión comprendida. Las retransmisiones son solicitadas rápidamente después de cada transmisión de paquetes, lo que minimiza el impacto sobre el rendimiento del usuario desde la recepción errónea de los paquetes. El incremento de la redundancia se utiliza en la rápida combinación y en los *buffers* receptores con *soft bits* para ser capaces de hacer una suave combinación entre los intentos de transmisión. [18]

5.12 Soporte Multicast y Broadcast

La difusión o *broadcast* de múltiples celdas, implica la transmisión de la misma información desde múltiples celdas. Mediante la explotación de éste en el terminal por la utilización eficaz de potencia de la señal desde múltiples sectores, puede lograrse una mejora sustancial en la cobertura (o una gran difusión de velocidad de transmisión de datos). Esto ya es desarrollado en WCDMA, donde en el caso de *broadcast/multicast* de múltiples celdas, un terminal móvil puede recibir señales procedentes de varias celdas y ser activado por una combinación suave de éstos dentro del receptor.

Esto tiene a LTE un paso más allá para proporcionar mayor eficiencia de difusión multicelda. Mediante la no transmisión de señales idénticas desde múltiples sectores de celda (con idéntica codificación y modulación), pero también sincronizando el tiempo de la transmisión entre las celdas, la señal en el terminal móvil se publicará exactamente como una señal de transmisión desde un único sector de celda y sujeto a la propagación multi-ruta. Debido a la estabilidad de la técnica OFDM, la propagación multi-ruta, es también referida como la transmisión *Multicast-Broadcast Single-Frequency Network* (MBSFN), no sólo servirá para mejorar la señal recibida, sino que también para eliminar las interferencias entre las celdas. Así, con OFDM, el rendimiento *broadcast/multicast* de múltiples celdas

eventualmente puede estar limitado sólo por ruido y puede entonces, en el caso de las pequeñas celdas llegar a valores extremadamente altos. [9]

5.13 Flexibilidad del Espectro

Un alto grado de flexibilidad del espectro es uno de las principales características del acceso radio de LTE. El objetivo de la flexibilidad es permitir el despliegue en diversos espectros, con diferentes características, incluyendo diferentes arreglos o sistemas dúplex, diferentes bandas de frecuencia de operación y los diferentes tamaños del espectro disponible. [3]

5.14 Flexibilidad en el Sistema dúplex

Una parte importante de los requisitos de LTE en términos de flexibilidad de espectro, es la posibilidad de desplegar el acceso radio basada en LTE en ambos espectros, pareados y no pareados, estos deben apoyar a LTE tanto en la división de frecuencia y la división en el tiempo basado en los sistemas dúplex. *Frequency Division Duplex* (FDD), implica que la transmisión de enlace ascendente y descendente ocurren en diferentes bandas de frecuencia cuando están suficientemente separados. *Time Division Duplex* (TDD), implica que la transmisión de enlace ascendente y descendente ocurren en diferentes intervalos de tiempo que no se solapan. Por lo tanto, TDD puede operar en el espectro no pareado, mientras que FDD requiere el espectro pareado.

El apoyo para ambos espectros, forma parte del comienzo de las especificaciones Release 99 a través del uso de FDD basado en el acceso radio de WCDMA/HSPA, en las asignaciones pareadas y TDD basado en el acceso radio de TD-CDMA/TD-SCDMA, en asignaciones no pareadas. Sin embargo, esto se logra por medio de relación de diferentes tecnologías de acceso radio y, en consecuencia, los terminales calificados de las operaciones FDD y TDD son relativamente poco frecuentes, en cambio, LTE soporta ambas operaciones dentro de una sola tecnología de acceso radio, destacando un mínimo de desviación entre FDD y TDD para la base del acceso radio. La diferencia entre ambas operaciones radica principalmente en la estructura de la trama (*frame*). [22]

5.15 Flexibilidad en la Frecuencia de banda de operación

LTE es pronosticado para el desarrollo con base a la necesidad de saber cuándo y dónde el espectro puede estar disponible, ya sea por la asignación de un espectro nuevo para comunicación móvil, tales como la banda de 2,6 GHz, o por la migración a LTE del espectro actualmente usado para otras tecnologías, tales como la segunda generación de Sistemas GSM, o incluso las tecnologías de radio no móviles tales como el actual espectro de *broadcast*. Como consecuencia de ello, se requiere que el acceso radio LTE debe ser capaz de operar en una amplia gama de bandas de frecuencias, desde la banda de 450 MHz hasta 2,6 GHz.

La posibilidad de operar una tecnología de acceso radio en distintas bandas de frecuencia no es nada nuevo. [9]

5.16 Flexibilidad del Ancho de banda

Relacionado con la posibilidad de desarrollar el acceso radio de LTE en diferentes bandas de frecuencias, es la oportunidad de LTE para que pueda operar con diferentes anchos de banda de transmisión en el enlace ascendente y descendente. La razón principal de esto, es que la cantidad de espectro disponible para LTE puede variar considerablemente entre diferentes bandas de frecuencia y también en función de la situación exacta del operador. Además, la posibilidad de operar en diferentes asignaciones de espectro, da la posibilidad de migración gradual del espectro de radio de otras tecnologías de acceso a LTE. [13]

LTE apoya la operación en una amplia gama de atribuciones de espectro, alcanzado por un ancho de banda de transmisión flexible que forma parte de las especificaciones 3GPP. Eficientemente soporta una muy alta velocidad de transmisión de datos cuando el espectro está disponible y cuando se es necesario un amplio ancho de banda de transmisión, sin embargo, una gran cantidad de espectro no siempre estará disponible, ya sea debido a la banda de operación o a una migración gradual desde otra tecnología de acceso radio, en cuyo caso LTE

puede funcionar con un ancho de banda de transmisión más estrecho. Obviamente, en tales casos, el máximo alcanzable de la velocidad de transmisión de datos se reducirá proporcionalmente. Más concretamente, LTE permite registrar para un sistema global de ancho de banda, desde pequeñas frecuencias como 1,4 MHz hasta 20 MHz, donde las más altas son requeridas para proporcionar mayor velocidad de datos. [9]

Todos los terminales LTE soportan el mayor ancho de banda. A diferencia de anteriores sistemas celulares, éste ofrece la posibilidad de operar para diferentes anchos de banda en enlace ascendente y descendente, permitiendo la utilización asimétrica del espectro. [18]

5.17 Esquemas de Modulación

Una forma directa para ofrecer altas velocidades de transmisión de datos dentro de un determinado ancho de banda, es el uso de la modulación de orden superior, lo que implica que el alfabeto de modulación se amplía para incluir más alternativas de señalización y para más bits de información se permite hacer la comunicación por medio de la modulación de símbolos.

Los esquemas de modulación disponibles para datos de usuario en el enlace ascendente y descendente son QPSK, 16QAM y 64QAM. Los dos primeros son útiles en todos los dispositivos, mientras que el apoyo para 64QAM en el enlace ascendente es la capacidad del equipamiento de usuario. [9]

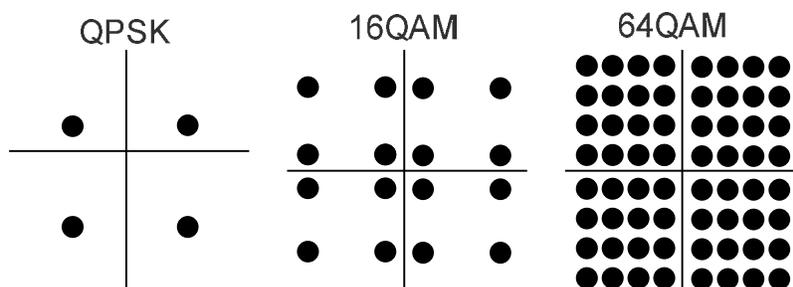


Ilustración 18: Constelaciones de modulación en LTE

5.18 Modulación y codificación en LTE

Los esquemas de modulación utilizados en LTE son QPSK, 16 QAM y 64QAM, mismos que manejan un número de estados o combinaciones determinados para acomodar los símbolos OFDM en base a la siguiente expresión: $N = 2^m$

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

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

En sistema LTE hace uso de modulación y codificación adaptativa, lo que quiere decir que si la SNR es lo suficientemente alta es posible hacer uso de una modulación de alto orden, por ejemplo 64-QAM, en el caso en el que el SNR sea bajo, se utilizan esquemas de modulación de bajo orden como QPSK. Particularmente, para el enlace descendente, LTE emplea un parámetro llamado CQI (*Quality Channel Indicator*) para medir la calidad del canal y establecer una modulación y codificación a un UE. Aunque cabe resaltar que dicho parámetro también depende de la calidad del equipo de cada usuario. [22]

La Tabla 3 muestra una lista de algunos de los índices de CQI utilizados en LTE.

Tabla 3: Índices de CQI

CQI	Modulación	Tasa de código aproximado	Eficiencia
0	No transmisión	-	-
1	QPSK	0.076	0.1523
2	QPSK	0.12	0.2344

3	QPSK	0.19	0.377
4	QPSK	0.3	0.6016
5	QPSK	0.44	0.877
6	QPSK	0.59	1.1758
7	16QAM	0.37	1.4766
8	16QAM	0.48	1.9141
9	16QAM	0.6	2.4063
10	64QAM	0.45	2.7305
11	64QAM	0.55	3.3223
12	64QAM	0.65	3.9023
13	64QAM	0.75	4.5234
14	64QAM	0.85	5.1152
15	64QAM	0.93	5.5547

Para la parte de codificación LTE implementa los modos de ARQ y FEC (*Forward Error Correction*) mediante un código de bloque o convolucional. A esto se le suma el uso de turbo códigos que hacen posible la codificación a tasas más altas. Por otro lado, LTE maneja algunos símbolos para mecanismos de control en el PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*), dependiendo si se hace uso de un prefijo cíclico normal o extendido, dicha cantidad de símbolos varía entre 1 y 4 y tiene un impacto directo en la codificación utilizada por un UE. [9]

5.19 AMC

LTE soporta varios esquemas de modulación y corrección de errores. Estos esquemas pueden ser cambiados según el usuario o según las tramas enviadas basándose en las condiciones del canal.

La AMC (Adaptive Modulation and Coding) es un mecanismo efectivo para maximizar el rendimiento de un canal que es variable en el tiempo. El algoritmo de adaptación siempre hace uso del esquema de modulación y codificación que permita que el usuario sea provisto con las tasas de datos más altas posibles que puedan ser soportadas por sus respectivos enlaces, de bajada o de subida. [20]

Tabla 4: Categorías de equipos de usuario

	Category							
	Release 8/9/10					Release 10 only		
	1	2	3	4	5	6	7	8
Enlace descendente (Mbit/s)	10	50	100	150	300	300	300	300
Enlace ascendente (Mbit/s)	5	25	50	50	75	50	150	150
Modulación máxima descendente	64QAM							
Modulación máxima ascendente	16QAM				64QAM	16QAM	64QAM	
Max. Núm. De capas para descendente	1	2			4	SEPARADOS		

5.20 Estructura de trama

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

Estructura de trama tipo 1: Esta estructura es válida para sistemas que operan en FDD y es usada tanto para el enlace ascendente como para el enlace descendente. En esta estructura el eje del tiempo se divide en tramas de 10 ms. Cada trama a su vez está compuesta por 20 ranuras temporales o slots, de duración 0.5 ms. [3]

Estructura de trama tipo 2: Diseñada para modo TDD, el eje del tiempo se divide en tramas de 10 ms y cada trama se compone de 10 subtramas de duración 1ms. En este caso hay subtramas dedicadas al enlace ascendente y descendente. En suma hay subtramas especiales que indican en qué modo se opera en un instante dado y que sirven para fines de sincronización.

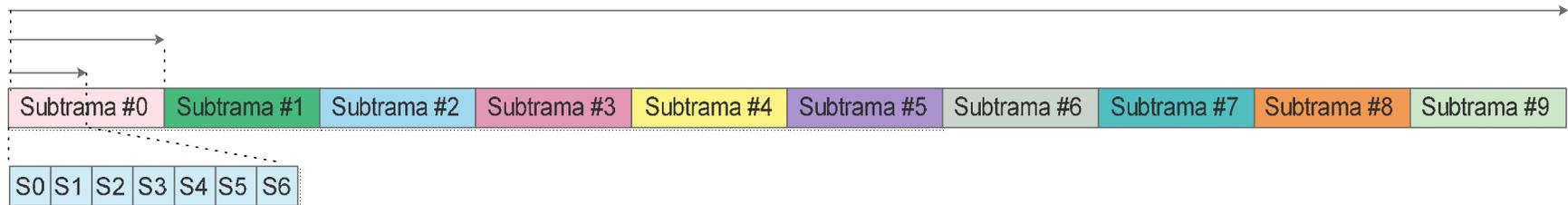


Ilustración 19: Estructura de trama tipo 1

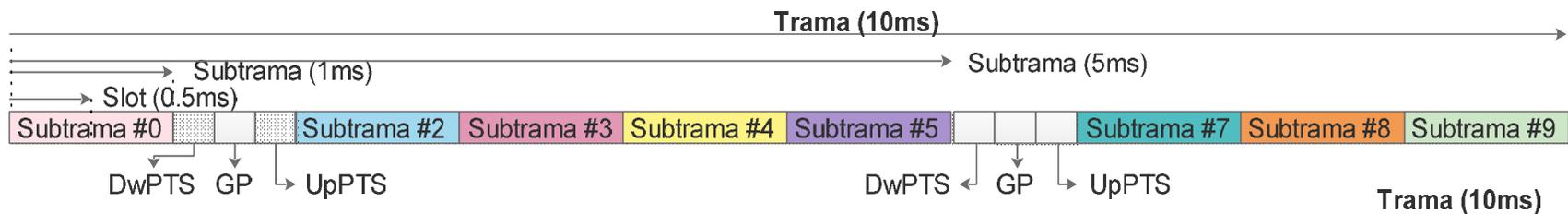


Ilustración 20: Estructura de trama tipo 2

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

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

- DwPTS: Downlink Pilot Signal, se usa para indicar que se opera en modo DL e incluso si tiene una duración grande, puede ser usado para información de usuario.
- UpPTS: Uplink Pilot Signal, al igual que la DwPTS, se usa para indicar que se opera en modo UL, pero puesto que su duración máxima es de 2 símbolos, no es apta para el envío de información de datos de usuario.
- GP: Guard Period, este campo el tiempo en que el sistema cambia de modo de UL a DL y viceversa, se recomienda que sea de una duración lo suficientemente larga para que todos los elementos de la red conmuten su modo de operación. [3]

CAPÍTULO 6: EL SERVICIO DE SCHEDULING EN LTE

El mecanismo de scheduling empleado por LTE es uno de sus puntos más fuertes y que lo hace el sistema base de las comunicaciones futuras.

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

El mecanismo de scheduling toma decisiones a los siguientes parámetros:

- Parámetros de QoS requeridos para una determinada aplicación
- Carga de datos almacenadas en buffer
- Retransmisiones pendientes
- Capacidad del UE
- Parámetros del sistema: ancho de banda, interferencia, potencia, etc.
- Tipo de suscripción que tiene el usuario [9]

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

Scheduling en el enlace ascendente: En este enlace, el mecanismo de scheduling determina que UEs están transmitiendo por el canal físico PUSCH, así como la subtrama y el PRB que están empleando. Debido a que para el enlace ascendente se usa SCFDMA, los PRBs asignados a cada UE, deben ser contiguos en el dominio de la frecuencia. Mientras que el scheduling del eNB

determina el formato de transporte (TF) que deberá usar cada UE, el multiplexado de canales lógicos se lleva a cabo dentro de cada UE.

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

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

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

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

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

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

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

Soporte de Ancho de banda variable: El E-UTRA (Evolved Universal Terrestrial Radio Access, Acceso de Radio Terrestre Universal Evolucionado) opera con asignaciones de espectro de diferentes tamaños tanto en el enlace descendente como el ascendente, además de soportar FDD y TDD. Los cambios pueden hacerse dinámicamente para soportar el roaming de los usuarios móviles a través de diferentes redes que pueden tener diferentes asignaciones de ancho de banda. [22]

Roaming: Debido a que LTE será el estándar 4G unificado a nivel mundial, sus dispositivos se pueden configurar para conseguir un eficiente roaming global.

Además, LTE debe soportar el roaming entre estándares 2G, 2.5G, 3G y 4G con el fin de garantizar al cliente una experiencia sin fallos.

El roaming de servicios móviles de telefonía, mensajes cortos y banda ancha, que en español equivale a abonado visitante o itinerante, se define como la capacidad del cliente del servicio móvil en un país de poder acceder con su mismo número y equipo a los servicios de llamadas, mensajes y datos y otros productos de banda ancha con su terminal –tanto de comunicaciones salientes como entrantes cuando deja el área de cobertura de su operador (red propietaria o Home Public Mobile Network, HPMN) para ingresar y utilizar los recursos de una red visitada(Visited Public Mobile Network, VPMN). Si esa transposición del área de cobertura se hace al atravesar las fronteras del país de origen, nos encontramos con el servicio de roaming internacional.

El servicio de roaming internacional ofrece al abonado celular tener las mismas facilidades de su servicio local de telefonía móvil cuando traspone las fronteras de su país, conservando su número y su terminal o dispositivo de usuario. Para quienes lo llaman o se comunican con él, su lugar de residencia virtual sigue siendo el área de cobertura de su operador propietario en su país de origen. [9]

Altas tasas máximas de datos: LTE tiene la capacidad de soportar, para el enlace descendente, una tasa de datos de 100 Mbps en un espectro de 20 MHz lo que indica una eficiencia de 5 bps/Hz. Con esta velocidad un usuario puede ser capaz de descargar un archivo de 5 Megabytes, como una canción, en aproximadamente medio segundo utilizando toda la capacidad.

Para el enlace ascendente, la tecnología LTE soporta una tasa de datos de 50 Mbps en un espectro de 20 MHz, otorgando una eficiencia espectral de 2.5 bps/Hz. [3]

6.1 Movilidad

La movilidad ofrece beneficios a los usuarios finales, por ejemplo, los servicios de bajo retardo, como la voz o conexiones de video en tiempo real se pueden mantener incluso en trenes de alta velocidad. La movilidad es beneficiosa también para los servicios que no implican movimiento del usuario como conectividad portátil. Permite mantener una conexión fiable especialmente en las zonas en que se cruzan dos celdas vecinas.

El precio de la movilidad normalmente está en la complejidad de la red tanto en los algoritmos como en la gestión de la misma. El objetivo de la red de radio LTE es proporcionar movilidad sin interrupciones en la comunicación y, al mismo tiempo, mantener simple la gestión de red. [15]

Se puede optimizar la E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network, Red de Acceso de Radio Terrestre Universal Evolucionado) para baja movilidad desde 0 a 15 Km/h y para una movilidad más alta, entre 15 y 120 Km/h, que es soportada con mayor desempeño. Se mantiene la

movilidad entre redes celulares a velocidades de 120 a 350 Km/h o mayores dependiendo de la banda de frecuencia. [3]

6.2 ARQ

LTE soporta Peticiones de Retransmisión Automáticas (ARQ, Automatic Repeat-reQuest). Una conexión habilitada para estas retransmisiones requiere que el receptor tenga conocimiento de cada paquete transmitido. Los paquetes que no sean de conocimiento del receptor son asumidos como paquetes perdidos y son retransmitidos. LTE también soporta un ARQ-híbrido, el cual es un efectivo híbrido entre FEC y ARQ, en donde FEC es la corrección de errores después de la transmisión. [20]

LTE ofrece la posibilidad de utilizar los recursos tanto en tiempo como en frecuencia, permitiendo el soporte de múltiples usuarios en un intervalo de tiempo. En cambio, la tecnología existente de 3G utiliza los recursos únicamente en tiempo o en frecuencia, lo que limita el servicio a un solo usuario para cada ranura de tiempo. Esta capacidad de LTE resulta en la experiencia de estar siempre conectado y permite la proliferación de aplicaciones y sistemas inalámbricos integrados. [12]

6.3 Seguridad

La seguridad es una mejora que LTE presenta frente a otros sistemas celulares debido a la implementación de la UICC (Universal Integrated Circuit Card, Tarjeta Universal de Circuito Integrado), la tarjeta SIM y las claves privadas de almacenamiento y de autenticación.

Adicionalmente, LTE incorpora una autenticación mutua, confidencialidad de la identidad del usuario, protección de la integridad de todos los mensajes de señalización entre el móvil y la Entidad de Gestión de Movilidad (MME), y cifrado o encriptación de datos opcional. [9]

En LTE, un terminal móvil puede estar en varios estados diferentes. Para el encendido (*power-up*), el móvil entra en el estado LTE_DETACHED y no es conocido por la red. Antes de cualquier comunicación nueva entre el terminal móvil

y la red, el terminal necesita registrarse con la red utilizando el procedimiento de acceso aleatorio para entrar en el estado LTE_ACTIVE o LTE_IDLE.

LTE_ACTIVE es utilizado cuando el terminal móvil es activado con la transmisión y recepción de datos. En este estado, el terminal móvil está conectado a una celda específica dentro de la red. Una o varias direcciones IP han sido asignadas al móvil, utilizando el C-RNTI (*Cell Radio-Network Temporary Identifier*). Los subestados IN_SYNC y OUT_OF_SYNC, dependen de si el enlace ascendente se sincroniza a la red o no. Si el enlace ascendente está en el estado IN_SYNC, es posible la transmisión de datos de usuario y el control de señalización. En caso de que no sea así, se tiene lugar dentro de una determinada ventana de tiempo, el momento de alineación no es posible y el enlace se declara OUT-OF-SYNC. En este caso, el terminal móvil necesita realizar un procedimiento de acceso aleatorio para restaurar la sincronización del enlace.

LTE_IDLE es un estado de baja actividad en la que el terminal móvil duerme la mayor parte del tiempo, con el fin de reducir el consumo de batería. La sincronización del enlace ascendente no es mantenida y, por tanto, la única actividad de transmisión que puede tener lugar, es el acceso aleatorio para ir a LTE_ACTIVE. En el enlace descendente el móvil puede periódicamente despertar con el fin de ser paginado para las llamadas entrantes y mantiene su dirección IP con el fin de moverse rápidamente a LTE_ACTIVE cuando sea necesario. [9]

6.4 QoS, Calidad de Servicio

Aplicaciones tales como VoIP, navegación por la *Web*, video telefonía y video *streaming*, tienen una especial necesidad por QoS. Por lo tanto, una importante función de cualquier red *allpacket* es proveer el mecanismo de QoS para la posible diferenciación de flujos de paquetes basado sobre los requerimientos QoS. En SAE, los flujos de QoS llamados portadores SAE, son establecidos entre el UE y el P-GW. Un portador radio transporta los paquetes de un portador SAE entre un UE y un eNB. Cada flujo IP es asociado con un distinto portador SAE y la red puede priorizar el tráfico como corresponde. Cuando es recibido un paquete IP desde Internet, el P-GW realiza la clasificación de paquetes

basado sobre seguros parámetros predefinidos y enviados en un adecuado portador SAE. [23]

Una característica importante es la simplificación en el manejo y caracterización de los parámetros que definen la QoS asociada a cada portador. Aunque actualmente está en definición, parece probable que cada portador SAE se asocie a una etiqueta y a un valor de ARP.

La etiqueta es un escalar que define un perfil de QoS. Este perfil definiría las características relativas a pesos de colas, umbrales de admisión, umbrales de gestión de colas y sería configurado por el operador en cada nodo (por ej. eNB).

El ARP determinaría la posibilidad de aceptar una nueva activación o modificación del portador en situaciones de congestión. Además, en situaciones excepcionales de congestión, el ARP podría ser utilizado para determinar los portadores que deben liberarse.

Otro parámetro que define la QoS de cada portador es la velocidad de transmisión requerida. En base a esto se distinguen dos tipos de portador: “GBR” (*Guaranteed Bit Rate*) y “Non-GBR”, dependiendo de que requieran o no una velocidad de transmisión garantizada, a fin de apoyar los servicios de *streaming* como IPTV o Radio Internet. Cabe indicar que, la arquitectura de Control de Políticas y Tarificación permite no sólo el control de QoS a nivel de portador, sino que también de forma opcional, el control y ejecución de políticas de QoS por flujo IP. [18]

6.5 Soporte QoS y VoIP

LTE/SAE es basado únicamente en paquetes, red *all-packet* o *all-IP*. Por defecto, todo dato es llevado sobre una base llamada “*best effort*” (traducida como “el mejor esfuerzo”) donde el desempeño varía de acuerdo al grado de congestión en la red. Para los servicios tales como la voz o la videoconferencia requieren velocidades invariables de bits y baja latencia de forma constante de extremo a extremo, a pesar de la carga en la celda. LTE soporta un conjunto flexible de capacidades QoS de extremo a extremo, que proporciona la conectividad con garantía de velocidad de bits y latencia. [9]

6.6 Servicios y Aplicaciones

La implementación de LTE es necesaria para proporcionar a los suscriptores una experiencia de usuario muy similar a lo que tenemos en casa con conexiones xDSL o cableadas.

- *High Definition (HD) video streaming*
- *Video Blogging*
- Videoconferencia
- Sincronización con otros dispositivos
- Web en tiempo real
- Juegos en línea en tiempo real
- Aplicaciones P2P

A continuación se describen algunos de los servicios y aplicaciones típicos que se pueden ejecutar en las redes LTE. La mayoría de estos servicios no son específicos de la tecnología misma, ya que han sido adoptados de las tecnologías anteriores, mostrando una mejora en su aplicación.

Push to talk para celulares: Es muy similar a la conocida comunicación de servicio *walkie-talkie*. Proporciona un servicio de voz uno-a-uno o uno-a-muchos, para un grupo de personas en modo *half duplex*, lo que significa que sólo puede hablar un participante en un momento dado, mientras que los demás están escuchando.

Presencia: El propósito de este servicio, es permitirle a un abonado que tenga su información de presencia disponible para otros usuarios de servidores de aplicaciones en la red. Proporciona más información sobre el estado de los abonados, tales como: actividad actual, ubicación, estado de ánimo, zona horaria, dirección de contacto, mensajería instantánea y lista de dispositivos de conectividad a cual se tiene acceso.

Banda ancha inalámbrica: La tecnología LTE proporciona una conexión semejante a la banda ancha tradicional con la ventaja de la movilidad. Con lo que bastará conectar el módem LTE a cualquier tipo de computadora y salir navegando por Internet.

Broadcast y Multicast: Este servicio es conocido como MBMS y el beneficio es que varios abonados pueden recibir los mismos datos al mismo tiempo, enviando una sola vez en cada enlace. Tiene un conjunto mucho más amplio de los tipos y aplicaciones, permitiendo la entrega de distintos tipos de datos multimedia. Se compone de dos servicios distintos: *broadcast* y *multicast* (difusión y multidifusión). Algunos ejemplos de aplicaciones típicas adecuadas para MBMS son:

Acceso a Internet: Navegación en la Web más rápida y eficiente. Servicios de búsqueda disponibles en celulares y en los *smartphones* 3G, para encontrar rápidamente enlaces, sitios, noticias, etc. Además de consultar mapas, descubrir cuál es el mejor camino para llegar a un lugar, o usar servicios de navegación.

Descargas de música y videos: Bajar una canción completa con rapidez o ver un video es una facilidad más de este tipo de tecnología. Con la tecnología LTE descargar una canción o un video toma segundos, mientras que, en las tecnologías anteriores, esto demora algunos minutos.

Video llamada y conferencia: LTE no sólo sirve para transmitir datos, sino que puede usarse en servicios como Skype para mejorar la calidad del audio en las llamadas e incorporar videochat.

Juegos Online: Para jugar en línea, la latencia es fundamental, porque permite mantener el juego fluido. LTE reduce estos tiempos de espera a casi cero, permitiendo jugar de forma instantánea.

Televisión Online: La mayor velocidad de este servicio permitirá tener servicios de video streaming, sino que también estos se verán en alta definición y se podrán recibir en vivo.

M-Comercio: Comercio móvil es un servicio dedicado a la transacción electrónica a través del teléfono móvil. Permite a las empresas ampliar su alcance en el mercado, ofrecer un mejor servicio y reducir los costos. [12]

CAPÍTULO 7: LTE-AVANZADA

Para la segunda mitad del año 2009 el 3GPP hizo una especificación referente a la propuesta de la ITU. Esta especificación número 10 evalúa LTE y LTE-avanzada como candidatas para lo que se denomina IMT-avanzadas, lo que identifica a un sistema móvil capaz de superar a IMT-2000.

Para lograr este nuevo objetivo, 3GPP ha incluido el desarrollo de sistemas más avanzados que los de 3G. Algunos de los parámetros claves de las IMT-avanzadas serán:

- Funcionalidad y roaming a nivel mundial
- Compatibilidad de servicios
- Interoperabilidad con otros sistemas de acceso por radio
- Tasas de datos mejoradas para soportar servicios avanzados y aplicaciones (100 Mbps para movilidad alta y 1 Gbps para baja movilidad)

Además de los parámetros especificados, una de las mayores razones para anexar LTE a las IMT-avanzadas es que los sistemas que conforman las IMT serán candidatos para futuras bandas nuevas de espectro que serán identificadas como WRC07. [18]

7.1 LTE vs WiMAX

Nos encontramos ante dos tecnologías inalámbricas que ofrecen grandes velocidades pudiendo llegar a cuadruplicar la velocidad actual.

Realmente podemos decir que se trata de dos tecnologías que trabajan sobre IP y que tienen mucho en común, ya que las dos proporcionan el mismo enfoque de las descargas y hacen uso de MIMO, lo que quiere decir que la información es enviada sobre dos o más antenas desde una misma celda. Además, las descargas están mejoradas en los dos sistemas ya que utilizan OFDM, que soporta transmisiones multimedia y de vídeo sostenidas.

Mucha gente opina que la gran diferencia entre estas dos tecnologías es meramente política, ya que depende de las compañías que las apoyan y sus respectivos intereses, aunque también hay quienes opinan que la diferencia está en el costo. Otros expertos opinan que la diferencia está en la cantidad de

espectro que necesita cada tecnología para poder llegar a las velocidades que los propios usuarios están exigiendo, ya que ambas pueden alcanzar grandes y muy similares velocidades y transmiten la señal de forma muy parecida.

En principio se piensa que una tecnología no debería destruir a la otra, pero en general se cree que la tecnología más usada será LTE ya que la mayoría de las operadoras a nivel mundial trabajan con GSM (Global System for Mobile Communications), a pesar de que el estándar WiMax ha sido ya aprobado definitivamente y la especificación final de LTE todavía no está disponible.

Aunque ya se han comentado algunas de las velocidades que pueden llegar a alcanzar ambas tecnologías, la realidad es que la velocidad real es difícil de asegurar ya que variará según la cantidad de abonados conectados en un momento determinado a una torre celular, la distancia a la que se encuentren de ella, la frecuencia que se utilice y la potencia de procesamiento del dispositivo que se esté usando. [17]

Tabla 5: Comparativa LTE – WiMax

Banda de frecuencia	2.3-2.4GHz, 2.496-2.67GHz, 3.3-3.8GHz	Frecuencias existentes y nuevas cercanas a 2GHz
Tasa de bits		
DL	75 Mbps	100Mbps
UL	25 Mbps	50Mbps
Ancho de banda del canal	5, 8.75, 10MHz	1.25-20MHz
Radio	2-7Km	5 Km
Capacidad	100-200 usuarios	>200 usuarios a 5MHz >400 usuarios para BW mayor
Eficiencia espectral	3.75 b/s/Hz	5 b/s/Hz
Movilidad		
Velocidad	Hasta 120 Km/h	hasta 250 Km/h
Handover	Hard Handover son soportados	Handover inter célula soft
Estándares	IEEE 802.16a hasta 16d	GSM/GPRS/EGPRS/UMTS/HSPA
MIMO		
DL	2Tx*2Rx	2Tx*2Rx
UL	1Tx*NRx	2Tx*2Rx

#código de palabras	1	2
Roaming	Nuevo	Auto por GSM/UMTS
Fechas		
Estándar completo	2005	2007
Inicio despliegue	2007-2008	2010
Producción en masa	2009	2012

Una de las ventajas que posee LTE sobre WiMax (*Worldwide Interoperability for Microwave Access* o Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas), consiste en que será capaz de ofrecer velocidades de descarga de hasta 60 Mbps y envíos de paquetes de información hasta de 40 Mbps, como ejemplo de ello tenemos que un archivo de 700 MB lo descargaríamos en aproximadamente 3 minutos, otras operadoras como Telefónica plantean que un archivo de RGB tendrán una descarga en 54 segundos frente a las 34,7 horas que podría descargar en GPRS ó 20 minutos en redes HSPA Fase II, su latencia no superará los 100 ms y su valor agregado consiste en que utilizaría las redes GSM actuales, es decir, su costo de implementación para las operadoras será mucho menor. [17]

7.2 Ventajas y Desventajas de LTE

El gran potencial del despliegue de la tecnología LTE se reflejaría por las siguientes ventajas:

- LTE impulsará las capacidades de los operadores de la red, permitiéndoles proporcionar una banda ancha móvil más rápida a más usuarios, con lo que revolucionarán el mercado de las telecomunicaciones móviles.
- LTE podría llevar la banda ancha móvil a las regiones menos pobladas y contribuir a la reducción de la brecha digital que existe entre las zonas rurales y urbanas.
- LTE utiliza el espectro radioeléctrico con más eficacia, permitiendo a las redes móviles sacar ventaja del “dividendo digital” y usar las frecuencias liberadas por el paso de la televisión analógica a la digital.

- Las señales con LTE viajarán más lejos que con la tecnología GSM, y realmente se reducirá el número de antenas necesarias para lograr la misma cobertura de la red, con lo que se preservarán los paisajes y disminuirá el consumo de energía.

- LTE ofrecerá a través de sus redes, grandes prestaciones con velocidades *peak* y menores latencias en cargas y descargas. Ello permitirá que los proveedores de servicios ofrezcan velocidades más altas de datos, suministren mayores tolerancias de ajuste de tráfico, incrementen la adopción de servicios de datos móviles y mejoren márgenes e ingresos promedios por usuario (ARPU (Average Revenue Per User)).

- LTE es totalmente compatible en sentido reverso con las tecnologías GSM/GPRS/EDGE, UMTS (WCDMA), HSPA y CDMA2000, apoyando también la movilidad entre redes heterogéneas no relacionadas al 3GPP, por ejemplo; WLAN, WiMAX.

- LTE utiliza OFDM para manejar elegantemente los problemas de la interferencia intersímbolo producida por el multi-paso, y simplifica enormemente la ecualización del canal. Siendo ligeramente más óptimo que los sistemas CDMA.

La ventaja que supone la armonización de LTE con las redes existentes, asegurando su interconexión con las mismas, aumentando la actual cobertura y permitiendo que una conexión de datos establecida por un usuario en el entorno LTE continúe cuando la cobertura LTE se desvanezca. Por su parte el operador tiene la ventaja de desplegar la red LTE de forma gradual, comenzando inicialmente por las áreas de gran demanda de servicios de banda ancha y ampliarla progresivamente en función de ésta. [9]

LTE tiene a su favor que, tanto en la fase de estandarización como en la de posterior despliegue está siendo apoyado por suministradores de equipos, institutos de investigación y operadores, sentándose las bases para la creación de lo que podríamos llamar un ecosistema saludable, no obstante en su contra puede jugar el tiempo que transcurra hasta su total comercialización debido a la competencia con otras potenciales tecnologías como WiMax. [18]

La infraestructura LTE está diseñada para ser tan simple como sea posible de implementar y operar, por poseer la característica de ser una tecnología flexible, ya que se puede desplegar en una amplia variedad de bandas de frecuencias, ofreciendo anchos de banda escalable de menos 5 MHz hasta 20 MHz, junto con el soporte de ambos espectros, FDD y TDD.

Con respecto a las desventajas, estas podrían ser generadas con base a:

- Los costos de la tecnología seguramente serán un tanto elevados en un comienzo, debido a las licitaciones del nuevo espectro LTE, renovación de equipo, costos de mantenimiento y costos operativos (ventas, marketing, sistemas de gestión de clientes, etc.), aunque esto se solucionará por medio de economías a escala.

- El tiempo de puesta en marcha de la tecnología. Esto podría generar, si es prolongado, algunas dudas sobre la factibilidad de la tecnología, ya que no se fue consecuente con las fechas reales de implementación.

- La competencia con otras tecnologías de banda ancha móvil, como WiMAX. Además de la variada oferta de tecnologías de banda ancha por cable módem o fibra, como el ADSL, ya que cada vez esta tecnología está ofreciendo mayores velocidades a los usuarios, entonces, si un operador va a competir con esta tecnología, su oferta deberá ser mucho más atractiva para el usuario final.

- A causa de que los nuevos servicios desplegados harán necesario que el uso del espectro sea el más eficiente posible, el actual espectro no será suficiente para la demanda futura, ya que los operadores nacionales tienen en su poder un espectro limitado y por debajo de lo recomendado por la GSMA. [15]

Conclusiones

Con este trabajo se puede dar una cuenta de lo rápido que avanza la tecnología en el mundo, lo acelerado que es el desarrollo de lo científico-tecnológico en el planeta.

A manera de conclusión puedo decir que la tecnología LTE sigue siendo mejorada y evolucionando como LTE-Avanzada para que pueda llegar considerada como un sistema 4G o de Cuarta Generación. La tecnología LTE es muy importante en las zonas en las que ya se ha instalado, como en las que se están adaptando porque es una tecnología que tiene futuro en cuanto a mejorar el servicio que se ofrece a los usuarios finales, además de su compatibilidad con los sistemas anteriores y la diferencia de los servicios que se dan y los que podrían darse.

Un punto a favor de LTE es que todo es por IPv4 y en un futuro IPv6. También se toma en cuenta el uso de dispositivos más avanzados y las aplicaciones en la nube. LTE con el acceso a banda ancha puede traer muchos beneficios en sectores como la educación, energía, salud, transporte, seguridad, etc., y que no solo puede ser aplicado en las zonas urbanas sino que también en las zonas rurales.

REFERENCIAS

- [1] R. Garrido, «Xataka México,» 22 Febrero 2012. [En línea]. Available: <https://www.xataka.com.mx/celulares-y-smartphones/que-es-la-tecnologia-lte>.
- [2] P. Rodríguez, «Xataka Móvil,» 19 Diciembre 2010. [En línea]. Available: <https://www.xatakamovil.com/conectividad/sistemas-de-comunicaciones-moviles-de-la-tercera-a-la-cuarta-generacion>.
- [3] J. R. Díaz Sánchez, «Ptolomeo,» 1 Mayo 2014. [En línea]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/3694/Tesis.pdf?sequence=1>.
- [4] L. Valle, «Palermo,» 16 Marzo 2010. [En línea]. Available: <http://www.palermo.edu/ingenieria/downloads/CyT6/6CyT%2012.pdf>.
- [5] E. Martínez, «Eveliux,» 12 Mayo 2001. [En línea]. Available: <http://www.eveliux.com/mx/La-evolucion-de-la-telefonía-movil.html>.
- [6] Blog, «MÁSblog,» 29 Julio 2014. [En línea]. Available: <http://blog.masmovil.es/la-evolucion-de-la-tecnología-movil-1g-2g-3g-4g/>.
- [7] J. François Pillou, «CCM,» 16 Agosto 2017. [En línea]. Available: <http://es.ccm.net/contents/682-telefonía-movil>.
- [8] A. Fernández López, D. González López y A. Rubio Lara, «Uhu,» 10 Julio 2002. [En línea]. Available: http://www.uhu.es/fernando.gomez/transydat_archivos/Movil.PDF.
- [9] R. Agusti Comes, F. Bernardo Álvarez, F. Casadevall Palacio, R. Ferrús Ferré, J. Pérez Romero y O. Sallent Roig, LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles, España: Fundación Vodafone España, 2010.
- [10] L. Pedrini, «telecomHall ES,» 21 Mayo 2015. [En línea]. Available: <http://www.telecomhall.com/es/que-es-csfb-y-srvcc-en-lte.aspx>.
- [11] F. Pérez, «Tierra de Lazaro,» 16 Abril 2016. [En línea]. Available: <http://www.tierradelazaro.com/wp-content/uploads/2016/04/4G.pdf>.
- [12] M. Jaramillo, «Dspace,» 9 Septiembre 2010. [En línea]. Available: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/30349/1/Implementaci%C3%B3n%20de%20Red%20M%C3%B3vil%20con%20Tecnolog%C3%ADa%204G%20LTE.pdf>.
- [13] C. Marcellini Yus, D. Martínez Silva y S. Quiroz Canepa, «Profesores,» 23 Agosto 2013. [En línea]. Available: <http://profesores.elo.utfsm.cl/~agv/elo322/1s13/project/reports/4GLTE.pdf>.

- [14] L. Pedrini, «telecomHall ES,» 28 Febrero 2014. [En línea]. Available:
<http://www.telecomhall.com/es/que-es-isi-interferencia-entre-simbolos-en-lte.aspx>.
- [15] C. Cox, *An Introduction to LTE*, India: WILEY, 2012.
- [16] Daniel, «tlm,» 1 Abril 2013. [En línea]. Available:
https://www.tlm.unavarra.es/~daniel/docencia/tar/tar13_14/slides/Tema3-version4.pdf.
- [17] L. Hanzo, Y. Akhtman, L. Wang y M. Jiang, *MIMO-OFDM for LTE, WIFI and WIMAX*, UK: WILEY, 2010.
- [18] I. Akyildiz, D. Gutierrez-Estevez y E. Chavarria Reyes, «The evolution to 4G cellular systems: LTE-Advanced,» *Physical Communication*, vol. I, nº 30332, p. 28, 2010.
- [19] C. 2, «bibing,» 16 Marzo 2011. [En línea]. Available:
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11983/fichero/Cap%C3%ADtulo+2+-+LTE.pdf>.
- [20] J. P. Calvo Pérez, «Catedraisdefe,» 12 Abril 2015. [En línea]. Available:
<http://catedraisdefe.etsit.upm.es/wp-content/uploads/2015/04/Juan-Pablo-Calvo-Perez-T1.pdf>.
- [21] M. Alvarez Campana, «Catedraidefe,» 16 Octubre 2014. [En línea]. Available:
<http://catedraisdefe.etsit.upm.es/wp-content/uploads/2015/04/Manuel-Alvarez-Campana-T3.pdf>.
- [22] E. d. Telecomunicación, «catedra-telefonicomovistar,» 16 Junio 2015. [En línea]. Available:
<http://www.catedra-telefonicomovistar.etsit.upm.es/sites/default/files/SeminarioLTE.pdf>.
- [23] K. E. Soto Soto, «Cybertesis,» 29 Mayo 2009. [En línea]. Available:
<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2009/bmfcis718l/doc/bmfcis718l.pdf>.