



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**PROTOCOLOS Y FUNCIONAMIENTO DE LA RED DE TELEFONÍA
BASADA EN TECNOLOGÍA LTE**

Miguel Alejandro Enrique Porras Jiménez

Asesorado por el Ing. César Augusto Menchú Tumax

Guatemala, mayo de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROTOCOLOS Y FUNCIONAMIENTO DE LA RED DE TELEFONÍA
BASADA EN TECNOLOGÍA LTE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

MIGUEL ALEJANDRO ENRIQUE PORRAS JIMÉNEZ

ASESORADO POR EL ING. CÉSAR AUGUSTO MENCHÚ TUMAX

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, MAYO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Sergio Leonel Gómez Bravo
EXAMINADOR	Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
EXAMINADOR	Ing. Byron Odilio Arrivillaga Méndez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PROTOCOLOS Y FUNCIONAMIENTO DE LA RED DE TELEFONÍA BASADA EN TECNOLOGÍA LTE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha 2 de noviembre de 2017.


Miguel Alejandro Enrique Porras Jiménez

Guatemala, 24 de enero de 2018

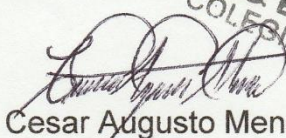
Ingeniero
Julio Cesar Solares Peñate
Coordinador de Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Solares:

Por este medio me complace dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: "PROTOCOLOS Y FUNCIONAMIENTO DE LA RED DE TELEFONÍA BASADA EN TECNOLOGÍA LTE", desarrollado por la estudiante Miguel Alejandro Enrique Porras Jiménez con carné 200815465, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos, por lo que el autor y mi persona somos responsables del contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente


CESAR AUGUSTO MENCHU TUMAX
ING. ELECTRONICO
COLEGIADO No. 13363
Cesar Augusto Menchú Tumax
Asesor
Colegiado No. 13363



REF. EIME 12 2018.

8 DE FEBRERO 2018.

FACULTAD DE INGENIERIA

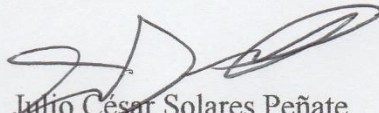
Señor Director
Ing. Otto Fernando Andrino González
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
PROTOCOLOS Y FUNCIONAMIENTO DE LA RED DE
TELEFONÍA BASADA EN TECNOLOGÍA LTE, del
estudiante Miguel Alejandro Enrique Porras Jiménez, que
cumple con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica



SFO



REF. EIME 12. 2018.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; MIGUEL ALEJANDRO ENRIQUE PORRAS JIMÉNEZ titulado: PROTOCOLOS Y FUNCIONAMIENTO DE LA RED DE TELEFONÍA BASADA EN TECNOLOGÍA LTE, procede a la autorización del mismo.


Ing. Otto Fernando Andrino González



GUATEMALA, 5 DE MARZO 2018.

Universidad de San Carlos
de Guatemala

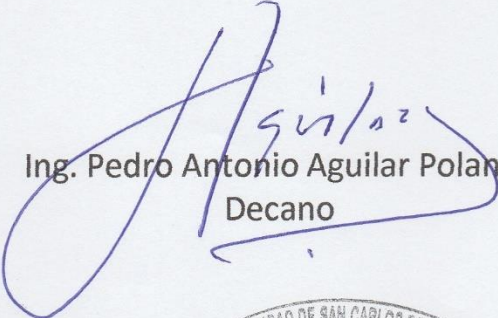


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 155 .2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **PROTOS Y FUNCIONAMIENTO DE LA RED DE TELEFONÍA BASADA EN TECNOLOGÍA LTE**, presentado por el estudiante universitario: **Miguel Alejandro Enrique Porras Jiménez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, mayo de 2018

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por estar siempre a mi lado guiándome en el camino correcto.
Mi madre	Blanca Rosa Jiménez Ochoa, por darme su apoyo en todo momento.
Mis hermanas	Blanca Rosa Porras y Francisca Porras, por ser una importante influencia en el área profesional.
Ing. Ronal Guillermo	Por ser un ejemplo en el ámbito profesional.
Mi hermano	Héctor Porras, por su apoyo y su ayuda incondicional en el transcurso de mi carrera profesional.
Lic. Jacqueline Morales	Por estar apoyándome en todo momento en mi carrera profesional.
Ing. César Menchú	Por brindarme ayuda y apoyo en el trascurso de mi carrera profesional.
Mis amigos	Álvaro Chacón y Miguel Argueta, por su valiosa amistad y apoyo en el transcurso de mi carrera profesional.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por ser mi guía en el trascurso de mi vida.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudio, la cual me dio la oportunidad de desarrollarme profesionalmente.
Facultad de Ingeniería	Por ser la Facultad que me brindó el conocimiento para poder desarrollarme profesionalmente.
Mis amigos de la Facultad	Álvaro Chacón y Miguel Argueta, por haber sido parte importante en el trascurso de la carrera.
Ing. César Menchú	Por darme apoyo en el desarrollo profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. LONG TERM EVOLUTION	1
1.1. 3gpp.....	1
1.2. Long Term Evolution	2
1.3. Características LTE	5
1.4. Estandarización	7
1.4.1. LTE	7
1.4.2. LTE <i>advanced</i>	8
2. ARQUITECTURA DEL SISTEMA LTE	9
2.1. Arquitectura genérica de los sistemas celulares.....	9
2.2. Arquitectura general de los sistemas 3GPP	10
2.3. Arquitectura del sistema LTE.....	10
2.4. Red de acceso evolucionada: E-UTRAN.....	13
2.4.1. Arquitectura de E-UTRAN	13
2.4.2. Entidades de red e interfaces	14
2.4.3. Protocolos.....	16
2.4.4. Comparación entre E-UTRAN y UTRAN	18
2.5. Red troncal evolucionada de paquetes: EPC	21

2.5.1.	Arquitectura de EPC.....	21
2.5.2.	Entidades de red e interfaces.....	21
2.5.3.	Protocolos	23
2.5.4.	Configuraciones de la red EPC	24
2.5.5.	Soporte de itinerancia (<i>roaming</i>)	24
2.6.	IP Multimedia Subsystem (IMS)	25
2.7.	Equipos de usuario.....	26
3.	MARCO DE GESTIÓN DE SESIONES, MOVILIDAD Y SEGURIDAD EN LTE	27
3.1.	Gestión de sesiones.....	27
3.1.1.	Servicio de conectividad ip: conexiones PDN	27
3.1.2.	Servicio portador EPS	28
3.1.3.	Modelo de QOS.....	29
3.1.4.	Control del servicio de conectividad: sistema PCC.....	30
3.1.5.	Procedimientos de gestión de sesiones	32
3.2.	Gestión de movilidad.....	34
3.2.1.	Marco de gestión de movilidad	34
3.2.2.	Gestión de la localización.....	36
3.2.3.	Mecanismo de <i>handover</i>	37
3.2.4.	Procedimientos de gestión de movilidad	39
3.3.	Gestión de seguridad	40
3.3.1.	Marco general de seguridad.....	40
3.3.2.	Seguridad de acceso a la red.....	40
3.3.3.	Seguridad en la infraestructura de red	42
3.3.4.	Procedimientos de gestión de seguridad.....	44

4.	PARÁMETROS DE SC-FDMA EMPLEADOS POR LTE.....	45
4.1.	Estructuras con varias antenas	45
4.1.1.	Caracterización de las estructuras MIMO.....	45
4.1.2.	Formulación de las estructuras MIMO.....	46
4.1.3.	Capacidad de las estructuras MIMO.....	46
4.1.4.	Precodificación	47
4.1.5.	MIMO multiusuario (MU MIMO).....	49
4.1.6.	Comparación entre estructuras MIMO y MU MIMO.....	50
4.2.	Estructuras de transmisión y recepción OFDMA con múltiples antenas.....	51
5.	INTERFAZ RADIO DEL SISTEMA LTE	53
5.1.	División funcional y pila de protocolos.....	53
5.2.	Radio Resource Control (RRC).....	53
5.3.	Packet Dependence Convergence Protocol (PDCP).....	54
5.4.	Capa RLC-MAC.....	54
5.4.1.	Funcionalidades relevantes de la subcapa RLC.....	54
5.4.2.	Funcionalidades relevantes de la subcapa MAC.....	55
5.5.	Capa física.....	55
5.5.1.	Concepto de bloque de recursos físicos (<i>physical resource block</i>)	56
5.5.2.	Estructura de trama	56
5.5.3.	Enlace descendente	57
5.5.4.	Enlace ascendente	57
5.6.	Mapeo entre canales físicos, de transporte y lógicos	58
5.7.	Categorías de terminales móviles en LTE	58
5.8.	Procedimientos básicos asociados a la interfaz aire	59

5.8.1.	Procedimiento de sincronización y adquisición inicial de parámetros.	59
5.8.2.	Procedimiento de acceso aleatorio	60
5.8.3.	Mecanismo de aviso (PAGING)	60
5.8.4.	Mecanismo de establecimiento del servicio portador de radio	61
5.8.5.	Mecanismo de información del estado del canal (CQI-REPORTING)	62
CONCLUSIONES.....		65
RECOMENDACIONES		67
BIBLIOGRAFÍA.....		69
APÉNDICE		71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Separación funcional entre eNB y MME/SGW	4
2.	Principio FDM.....	6
3.	Ortogonalidad de las ondas portadoras	7
4.	La arquitectura básica de un teléfono móvil	9
5.	Arquitectura 3GPP	10
6.	Arquitectura de red LTE	12
7.	Red de acceso E-UTRAN	14
8.	Protocolos de las interfaces S1 (izquierda) y X2 (derecha).....	17
9.	Comparación de la arquitectura de red de E-UTRAN y UTRAN	20
10.	Punto de acceso inalámbrico	25
11.	Equipo de usuario	26
12.	EPS	29
13.	Componentes de la seguridad de acceso a la red	41
14.	Formato de un paquete IPsec ESP en modo túnel1	43
15.	Esquema de una estructura MIMO.....	47
16.	Precodificación	49
17.	Esquema MIMO multiusuario	50
18.	Procedimiento de sincronización.....	60
19.	Secuencia de mensajes en el procedimiento de establecimiento de la conexión	62

TABLAS

I.	Entidades de red e interfaces de <i>e-trun</i>	20
----	--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
bps	<i>Bit por segundo</i>
BC	<i>Broadcast</i>
CS	<i>Circuit switching</i>
CN	<i>Core network</i>
4G	Cuarta generación de redes móviles
EPS	Enhanced Packet Switching
eNB	<i>Evolved node B</i>
f	Frecuencia
0G	Generación cero de redes móviles
Gbps	Giga bit por segundo
GHz	Giga Hertz
Hz	Hertz
HeNB	<i>Home evolved node B</i>
Kbps	Kilo bit por segundo
KHz	Kilo Hertz
Mbps	Mega bit por segundo
MHz	Mega Hertz
MMS	Multimedia Message Service
FDM	Multiplexación por división de frecuencia
TDM	Multiplexación por división de tiempo
NB	<i>Node B</i>
PS	<i>Packet switching</i>
1G	Primera generación de redes móviles

QoS	<i>Quality of service</i>
5G	Quinta generación de redes móviles
RNS	Radio Network Subsystem
2G	Segunda generación de redes móviles
SMS	Short Message Service
Tbps	Tera bit por segundo
THz	Tera Hertz
3G	Tercera generación de redes móviles
UE	<i>User equipment</i>

GLOSARIO

3GPP	Third Generation Partnership Project. Entidad responsable de la estandarización y control de los protocolos para las tecnologías de telecomunicaciones.
APN	<i>Access point name</i> . Conjunto de configuraciones asignado a un grupo de UE para su acceso a Internet.
ATM	<i>Asynchronous transfer mode</i> . Modo de transferencia de datos de manera asíncrona.
AuC	<i>Authentication center</i> . Elemento de red responsable de la autenticación de usuarios.
EIR	<i>Equipment identity register</i> . Elemento de red responsable de indicar si el usuario tiene, o no, autorización para registrarse en la red.
EUTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network. Técnica utilizada por LTE para el acceso a la red.

FCC	Federal Communications Commission. Entidad encargada de velar por que las UE cumplan con los requisitos de radiación mínimos para evitar daños a los seres humanos.
GGSN	<i>Gateway GPRS support node</i> . Elemento de red responsable de brindar el enlace a la nube al usuario.
GPRS	<i>General packet radio service</i> . Protocolo de segunda generación para la transferencia de datos.
HEnB	<i>Home eNB</i> . Elemento de red que permite la conexión de usuarios a la red.
HEnB-GW	<i>Home eNB gateway</i> . Elemento de red que permite la conexión de usuarios al bloque de red ECP.
HLR	<i>Home location register</i> . Elemento de red que almacena información de los usuarios de la red.
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access. Tecnología 3G para redes móviles especialmente diseñada para enlaces descendentes.
HSPA	High-Speed Packet Access. Tecnología 3G para redes móviles.
HSPA+	Evolved High-Speed Packet Access. Tecnología 3,75G para redes móviles.

LTE	Long Term Evolution. Tecnología 3,9G para redes móviles.
SGSN	<i>Serving GPRS support node</i> . Elemento de red responsable de enviar las solicitudes de navegación al GGSN.
S-GW	<i>Serving-gateway</i> . Elemento de red encargado de enviar las solicitudes de acceso al P-GW.
SMSC	<i>Short message service center</i> . Elemento de red encargado de la administración y entrega de los mensajes de texto corto.
<i>Streaming</i>	Servicio proporcionado por la red para ver videos en línea a altas velocidades.
UTRAN	UMTS Trrestrial Radio Access Network. Técnica utilizada por HSPA+ para el acceso a la red.
VLR	<i>Visitor location register</i> . Elemento de red que almacena información sobre usuarios visitantes en la red.

RESUMEN

El termino LTE se acuñó inicialmente en 3GPP para denominar una línea de trabajo interna cuyo objeto de estudio era la evolución de la red de acceso de UMTS, denominada UTRAN. Formalmente, la nueva red de acceso recibe el nombre de E-UTRAN (Evolved UTRAN), aunque muchas veces se utiliza también el término LTE en las especificaciones como sinónimo de E-UTRAN. Asimismo, en lo concerniente a la red troncal, 3GPP utilizó el término SAE (System Architecture Evolution) para referirse a las actividades de estudio relacionadas con la especificación de una red troncal evolucionada de conmutación de paquetes. Formalmente, dicha red troncal se denomina EPC (Evolved Packet Core) o también Evolved 3GPP Packet Switched Domain, y de la misma forma que pasa con la red de acceso, es común encontrar el término de SAE como sinónimo de EPC.

La combinación de la red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC es lo que constituye la nueva red UMTS evolucionada y recibe el nombre formal de EPS (Evolved Packet System). La primera especificación del sistema EPS ha sido incluida en las especificaciones del 3GPP.

OBJETIVOS

General

Desarrollar de manera documental la información de la última tecnología utilizada en la red de telefonía móvil, para tener una herramienta que proporcione el conocimiento necesario para competir en el ámbito laboral en el área de telefonía móvil.

Específicos

1. Dotar a los profesionales de Ingeniería Mecánica Electrónica de una herramienta técnica de información que contemple el funcionamiento de la red móvil LTE.
2. Documentar los protocolos, procedimientos y funcionamiento de la red telefonía móvil LTE.
3. Proporcionar un instrumento idóneo que facilite las bases necesarias de telefonía móvil LTE, que dispongan de conocimiento actualizado y contribuyan a facilitar el acceso al mercado laboral de la telefonía móvil LTE.

INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de la información, las comunicaciones en general y las comunicaciones móviles en particular tienen una incidencia decisiva en el crecimiento económico, la competitividad y la mejora de la productividad. El terminal móvil ha llegado a constituir hoy en día una parte esencial en la esfera de objetos personales. En este contexto, la industria de las comunicaciones móviles ha venido aportando soluciones al mercado, en la forma de sucesivas generaciones de sistemas. La globalización de los mercados y la búsqueda de economías de escala son algunos de los principales argumentos (esgrimidos ya en la concepción de la segunda generación de comunicaciones) que justifican el interés y el desarrollo de sistemas estándares, resultado del consenso entre los diferentes agentes implicados. Así, los diferentes organismos y foros de estandarización adquieren una relevancia muy significativa en el marco general del negocio de las comunicaciones móviles

En el caso de LTE, las especificaciones emanan del 3GPP. Puede decirse que el primer paso hacia LTE se llevó a cabo en noviembre de 2004, cuando 3GPP TSG RAN organizó un Workshop sobre RAN Evolution, en Toronto (Canadá), en el que se presentaron unas 40 contribuciones con ideas, propuestas, etc. En el propio Workshop se identificaron una serie de requisitos de alto nivel, como un coste por *bit* reducido, mejora en la provisión de servicios, flexibilidad en el uso de las bandas frecuenciales, arquitectura simplificada con interfaces abiertos, consumo de potencia en el terminal razonable, etc. También se puso de manifiesto que el esfuerzo de estandarización que esta evolución, bautizada como E-UTRAN (Evolved

UTRAN), llevaría asociado solo resultaría justificable si las mejoras fueran significativas.

1. LONG TERM EVOLUTION

1.1. 3gpp

3GPP (Third Generation Partnership Project, Proyectos de Asociación de Tercera Generación) 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, Telecomunicaciones Móviles Internacionales-2000) de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, UIT.

El 3GPP desarrolla estándares de tercera generación para sistemas basados en GSM y las especificaciones en las que se enfoca son:¹

- RAN (Radio Access Networks, Redes de Acceso por Radio).
- SA (Service & Systems Aspects, Aspectos de Servicios y Sistemas).
- CT (Core Network & Terminals, Red de Núcleo y Terminales).
- GERAN (GSM EDGE Radio Access Networks, Redes de Acceso por Radio GSM y EDGE).

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

¹ GUEVARA TOLEDO, A. *Estado actual de las redes LTE en Latinoamérica*. 2013. p 15.

ancha inalámbrica, el organismo 3GPP comenzó su investigación inicial del estándar LTE (Long Term Evolution, Evolución a Largo Plazo) como una tecnología viable en el año 2004. Entre las ventajas sobre otras tecnologías inalámbricas actuales que se esperan de la tecnología LTE, está el aumento de los parámetros de rendimiento, como altas tasas máximas de datos, baja latencia y mayor eficiencia en el uso del espectro inalámbrico.

Las características y beneficios 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.

1.2. Long Term Evolution

Los requerimientos generales que determinó la 3GPP para el diseño de la red LTE fueron:

- Red simplificada sin división de dominios
- Red unificadora con tecnologías previas
- Red eficiente y automatizada
- Velocidades de datos comparables con la banda ancha fija
- La reducción de costos por *bit* en el tráfico
- Mejor calidad y tipos de servicio
- Ahorro de energía en los terminales móviles

Para poder lograr estos objetivos la 3GPP consideró los avances realizados por el Comité de Estándares LAN/MAN (LMSC - LAN/ MAN Standard Committe) [10]. El LMSC presentó el estándar IEEE 802.16e para accesos móviles de banda ancha inalámbrica. El estándar 802.16e empleó una tecnología de acceso distinta llamada OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal) que mejoró la velocidad de datos y la eficiencia espectral que entregaba la última tecnología 3G (HSPA), a la familia de las normas IEEE 802.16 se le llamó WIMAX Móvil (Worldwide Interoperability for Microwave Access).

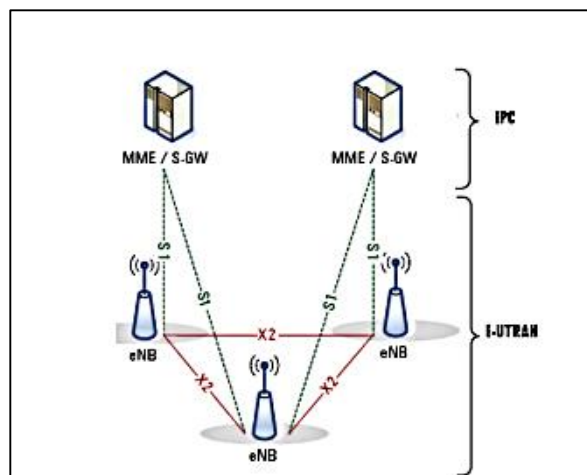
Como el estándar 802.16e estaba referido a sistemas que soportaban movilidad, además de que empleaba una arquitectura de red de datos más simple y basada en protocolo IP, la 3GPP tomó este estándar como guía para desarrollar un sistema que tuviera OFDMA como tipo de acceso. Por otra parte, la 3GPP desarrolló otro proyecto paralelo llamado System Architecture Evolution (SAE), que impulsó la idea de obtener una red de transmisión de paquetes basada totalmente en IP (para voz y datos). Este proyecto definía un núcleo de red de paquetes (EPC – Evolved Packet Core) con el objetivo de eliminar la separación de los dominios de paquetes (PS) y de circuitos (CS) en el núcleo de red.

La arquitectura de red LTE está formada por los siguientes bloques:

- UE: User Equipment (equipo de usuario)
- eNB: Evolved Node-B (Nodo-B evolucionado)
- MME: Mobility Management Entity (entidad de gestión de movilidad)
- GW: Gateway (puerto de enlace)

A su vez, el subsistema Gateway (GW) está formado por bloques. El Serving-Gateway (SGW) y el Packet Data Network Gateway (PGW).

Figura 1. **Separación funcional entre eNB y MME/SGW**



Fuente elaboración propia.

Como se ve en la figura, el conjunto de estaciones base eNB corresponde a la red de acceso de radio E-UTRAN (Evolved- UMTS Terrestrial Radio Access Network), mientras que el conjunto de MME y GW (en la imagen SGW) interconectados corresponde al núcleo de red EPC (Evolved Packet Core). La interfaz X2 permite la interconexión uno a uno entre eNBs, mientras que la

interfaz S1 logra la conexión de varios eNBs a MME o SGW (ver figura 3.4). La conexión entre estaciones bases eNBs ya no se realiza a través de un controlador de radio (RNC) como en UMTS. Todas las funciones del RNC se incorporan al eNB.

De esta forma el control de los recursos de radio y la comunicación entre eNB cercanas es mucho más directa. Las redes LTE separan en dos planos la transferencia de datos de usuario y de control en la interfaz de radio. En el plano de usuario circulan los datos del usuario, permitiendo la distribución y procesamiento de los servicios y aplicaciones en el terminal móvil, mientras que en el plano de control se distribuye y procesa la información de control propia del sistema, permitiendo la supervisión de la red. Esta separación entrega un mayor control de los datos y una mejor calidad de tráfico cuando la red está congestionada. Cada uno de estos planos posee una pila de protocolos que permite realizar las diversas funciones de cada bloque de la arquitectura de red.

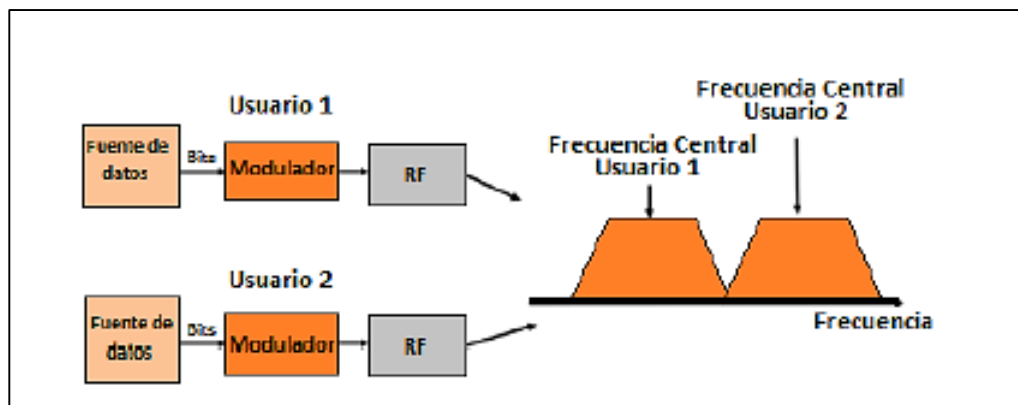
1.3. Características LTE

LTE es una solución de banda ancha móvil que ofrece varias características con mucha flexibilidad en términos de despliegue y servicios potenciales. Algunos de los parámetros más importantes que merecen ser mencionados son los siguientes:

- OFDM y 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. La OFDM tiene a la FDM como principio. En la FDM los datos de un usuario se transmiten constantemente en una sola frecuencia como se muestra en la figura 1-5, mientras que con la OFDM los datos se dividen y se transmiten continuamente por varias subportadoras de menor capacidad.

Figura 2. Principio FDM



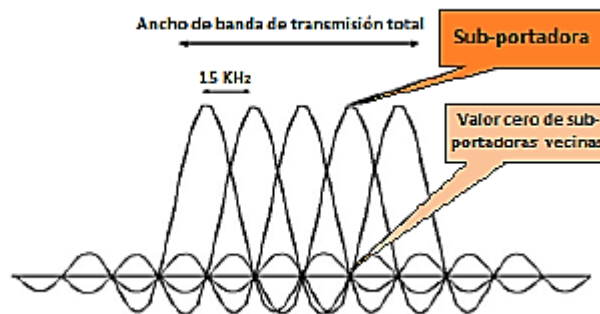
Fuente elaboración propia.

Como se explicó anteriormente, 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. En la OFDM se crean subportadoras 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, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 3. **Ortogonalidad de las ondas portadoras**



Fuente elaboración propia.

1.4. Estandarización

Se describe la estandarización del uso de LTE:

1.4.1. Lte

Todo lo anteriormente explicado coopera para que se pueda especificar las ventajas que significaría el hecho de emplear LTE.

- Con LTE será posible llegar a velocidades de hasta 200 Mbps.
- La latencia, es decir el retardo en la respuesta desde la red, será menor a 10 milisegundos.

- Se contará con una arquitectura de red basada únicamente en el protocolo IP que permitirá a los operadores reducir el costo de los servicios que ofrecen, y a su vez permitirá a los usuarios contar con nuevas posibilidades de servicios multimedia interactivos. Con ello se tendrá que el costo de esta tecnología se reducirá notablemente.
- Se generará una alta eficiencia en lo que respecta a los costos de operación de las redes, lo cual permitirá reducir el impacto ambiental en la zona donde esta se implemente.

1.4.2. Lte *advanced*

LTE Advanced es un estándar de comunicación móvil preliminar, formalmente inscrito como un candidato al sistema 4G a la ITU-T a finales de 2009, y con fecha estimada de finalización en 2011. Es estandarizado por la 3rd Generation Partnership Project (3GPP) como una mejora al estándar Long Term Evolution (LTE).

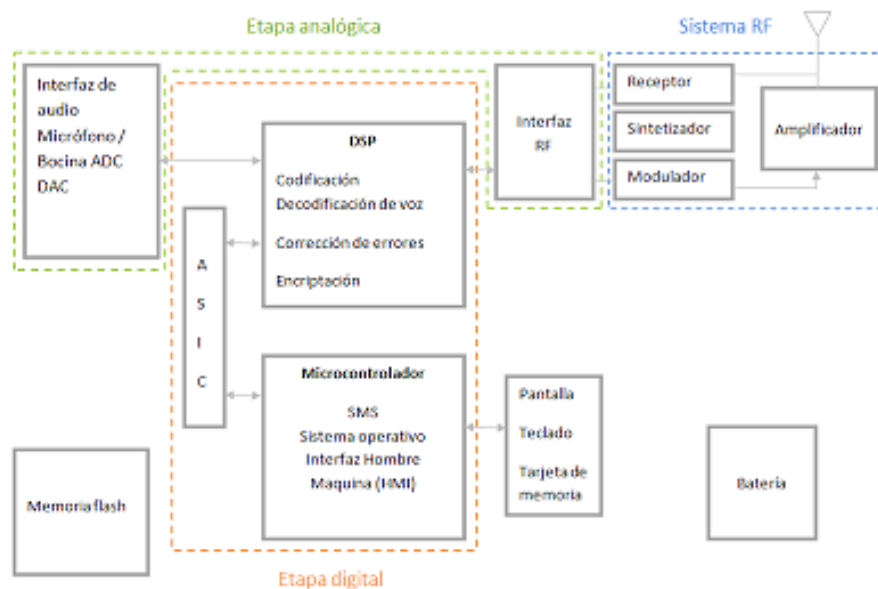
2. ARQUITECTURA DEL SISTEMA LTE

2.1. Arquitectura genérica de los sistemas celulares

Se entiende por teléfono móvil o celular un dispositivo electrónico de comunicación, por lo general de tamaño pequeño, peso ligero, portable e inalámbrico que tiene como objetivo principal establecer una comunicación con otros teléfonos móviles o fijos mediante transmisión de radiofrecuencia (RF).

La arquitectura básica de un teléfono móvil se compone a grandes rasgos de los siguientes elementos:

Figura 4. La arquitectura básica de un teléfono móvil

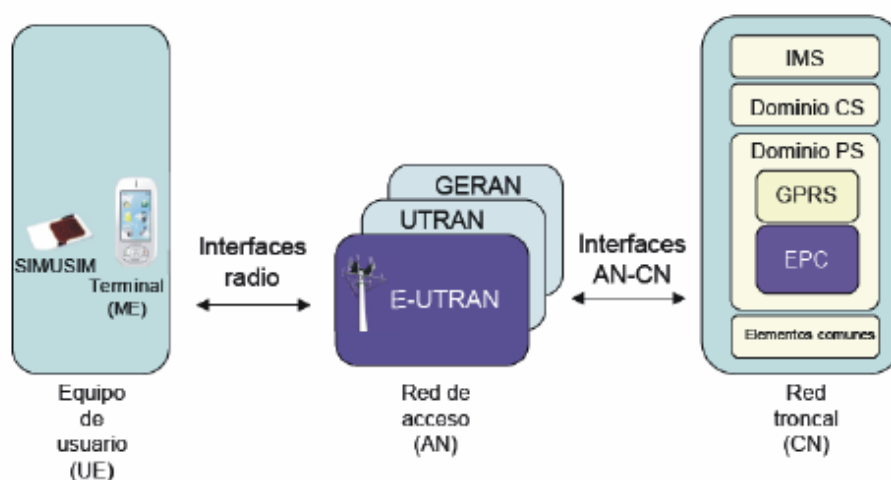


Fuente elaboración propia.

2.2. Arquitectura general de los sistemas 3GPP

Las arquitecturas de red contempladas en la familia de sistemas especificados por 3GPP se adaptan a la arquitectura genérica de los sistemas celulares. Tal como se muestra en la figura, los sistemas 3GPP abarcan la especificación del equipo de usuario y de una infraestructura de red que se divide de forma lógica en una infraestructura de red troncal (Core Network, CN) y una de red de acceso (Access Network, AN).

Figura 5. **Arquitectura 3GPP**



Fuente: Centro de Gestión de la Red Panorama, División de Servicios Internacionales, ETECSA.

2.3. Arquitectura del sistema LTE

La arquitectura de una red es la forma en la que se interconectan varios elementos que tienen las tecnologías adecuadas para definir los servicios y protocolos que satisfacen los requerimientos de red. Para implementar una red

LTE se debe considerar que debe soportar una transmisión de datos efectiva, una alta calidad de servicio y que debe soportar mayor movilidad que las anteriores tecnologías. Para alcanzar los objetivos de LTE es preciso implementar una arquitectura de red plana. Estas estructuras tienen tendencia a simplificar lo máximo posible la jerarquía, especialmente reduciendo la cantidad de elementos que se ocupan en la red. Por ejemplo, el componente radio en LTE debe asumir funciones que en otros sistemas se hallan distribuidas en diferentes plataformas.² Así, la arquitectura de los nuevos sistemas está diseñada para cumplir con varios requerimientos de funcionamiento del sistema como:

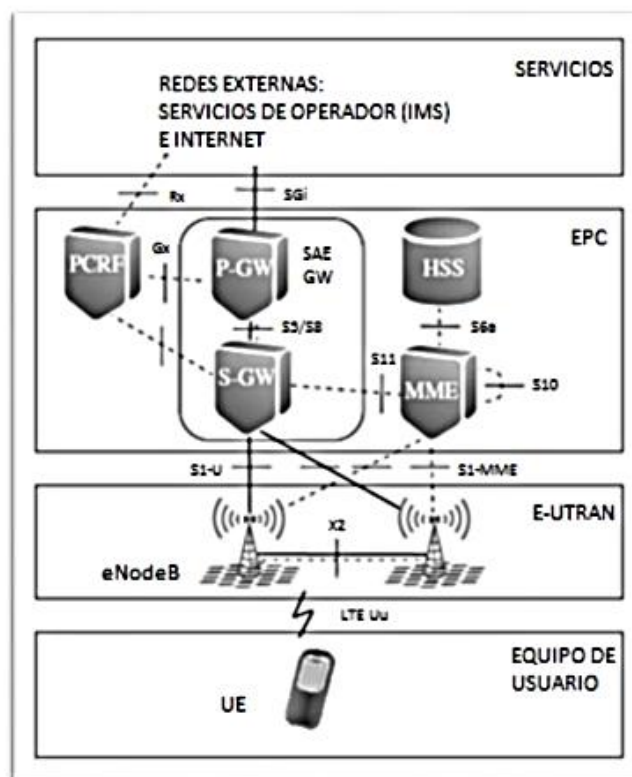
- Arquitectura simplificada orientada hacia una red IP
- Óptima administración en la calidad de servicios
- Interoperabilidad con otras redes 3GPP y redes inalámbricas
- Incremento en la eficiencia del espectro
- Mayor rendimiento para transferencias más altas de datos
- Reducción de la latencia de la red
- Mejor distribución de recursos y utilización del canal
- Todos los servicios utilizan conmutación de paquetes

La arquitectura de una red del sistema LTE es conocida como EPS (Evolved Packet System, Sistema de Paquetes Evolucionado). Básicamente este sistema está compuesto, como se muestra en la figura 1-9, por los Equipos de Usuario (UE), la red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC (Evolved Packet Core, Núcleo de Paquetes Evolucionado). Estos últimos representan la capa de conexión IP cuyo objetivo principal es garantizar una alta conectividad.

² Guevara. T. Estado actual de las redes LTE en Latinoamérica. 2013. p 45.

La red troncal de los anteriores sistemas 3GPP estaba dividida en forma lógica por: Dominio de Circuitos (CS), Dominio de Paquetes (PS) y Subsistema Multimedia IP (IMS). El Dominio de Circuitos es el encargado de proveer los servicios de telecomunicaciones mediante la conmutación de circuitos, utilizados en las redes de acceso anteriores llamadas UTRAN. Para el caso de las redes evolucionadas E-UTRAN de LTE no se contempla el uso del Dominio de Circuitos debido a que todos sus servicios están orientados únicamente al Dominio de Paquetes. El Subsistema Multimedia IP (IMS) es un conjunto de especificaciones utilizado como capa de conectividad hacia los servicios de telefonía y multimedia a través de IP.

Figura 6. **Arquitectura de red LTE**



Fuente: LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access.

2.4. Red de acceso evolucionada: E-UTRAN

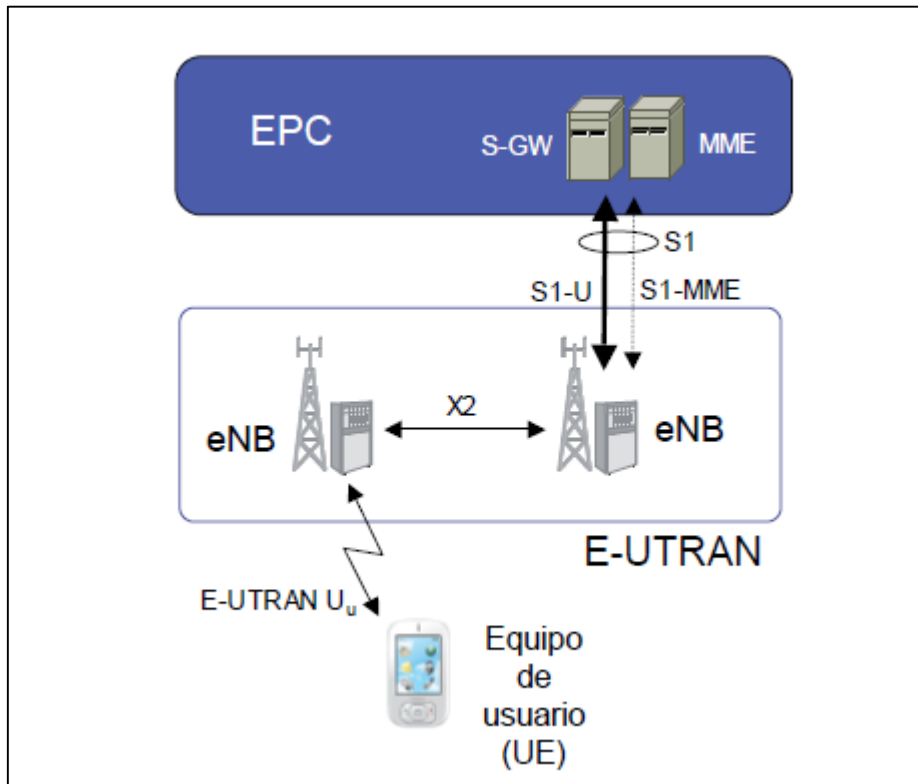
El cambio más significativo en este bloque, con respecto a HSPA+, es la sustitución de los nodos B por los eNodos B. El bloque EUTRAN es responsable de la completa gestión de radio. Se encuentra compuesto por eNodos B y la interfaz X2. La función básica del bloque EUTRAN es compartir información y tráfico de datos entre el bloque UE y el bloque EPC. En la figura 13 se observa la estructura del bloque EUTRAN.

2.4.1. Arquitectura de E-UTRAN

E-UTRAN es la red de acceso especificada para LTE, que utiliza la tecnología OFDMA en la interfaz radio para la comunicación con los equipos de usuario. La arquitectura de la red de acceso se compone de una única entidad de red denominada *evolved NodeB* (eNodeB) que constituye la estación base de E-UTRAN. Así pues, la estación base E-UTRAN integra toda la funcionalidad de la red de acceso, a diferencia de las redes de acceso de GSM y UMTS compuestas por estaciones base (BTS, NodoB) y equipos controladores (BSC y RNC). La descripción de la arquitectura de E-UTRAN se detalla en las especificaciones del 3GPP TS 36.300 y TS 36.401.

Tal y como se ilustra en la siguiente figura, una red de acceso E-UTRAN está formada por eNodeBs que proporcionan la conectividad entre los equipos de usuario (UE) y la red troncal EPC. Un eNodeB se comunica con el resto de elementos del sistema mediante tres interfaces: E-UTRAN Uu, S1 y X2.

Figura 7. Red de acceso E-UTRAN



Fuente: MISHRA, R. *Fundamentals of cellular network planning and optimization* 2004. p 267

2.4.2. Entidades de red e interfaces

La interfaz E-UTRAN U_u, también denominada LTE U_u o simplemente interfaz radio LTE, permite la transferencia de información por el canal radio entre el eNodeB y los equipos de usuario. Todas las funciones y protocolos necesarios para realizar el envío de datos y controlar la operativa de la interfaz E-UTRAN U_u se implementan en el eNodeB.

El eNodeB se conecta a la red troncal EPC a través de la interfaz S1. Dicha interfaz está desdoblada en realidad en dos interfaces diferentes: S1-MME para sustentar el plano de control y S1-U como soporte del plano de usuario. La separación entre plano de control y plano de usuario es una característica importante en la organización de las torres de protocolos asociadas a las interfaces de la red LTE.

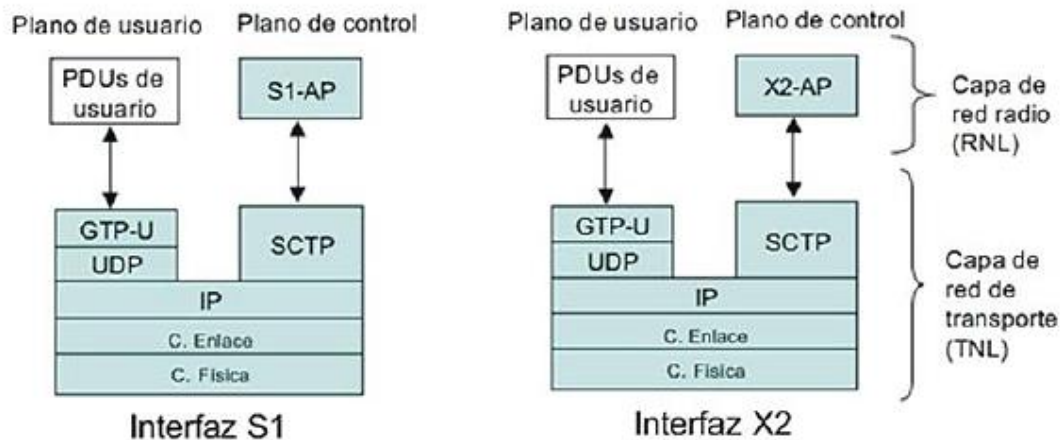
Así pues, el plano de usuario de una interfaz se refiere a la torre de protocolos empleada para el envío de tráfico de usuario a través de dicha interfaz (e.g., paquetes IP del usuario que se envían entre E-UTRAN y EPC a través de S1-U). Por otro lado, el plano de control se refiere a la torre de protocolos necesaria para sustentar las funciones y procedimientos necesarios para gestionar la operación de dicha interfaz o de la entidad correspondiente (e.g., configuración de la operativa del eNodeB desde la red EPC a través de S1-MME). Esta separación entre plano de control y plano de usuario en la interfaz S1 permite realizar la conexión del eNodeB con dos nodos diferentes de la red troncal. Así, mediante la interfaz S1-MME, el eNodeB se comunica con una entidad de red de la EPC encargada únicamente de sustentar las funciones relacionadas con el plano de control (dicha entidad de red de la red troncal EPC se denomina Mobility Management Entity, MME). Por otro lado, mediante la interfaz S1-U, el eNodeB se comunica con otra entidad de red encargada de procesar el plano de usuario (dicha entidad de red de la EPC se denomina Serving Gateway, S-GW). Esta separación entre entidades de red dedicadas a sustentar el plano de control o bien el plano de usuario es una característica importante de la red LTE que permite dimensionar de forma independiente los recursos de transmisión necesarios para el soporte de la señalización del sistema y para el envío del tráfico de los usuarios.

Opcionalmente, los eNodeBs pueden conectarse entre sí mediante la interfaz X2. A través de esta interfaz, los eNodeB se intercambian tanto mensajes de señalización destinados a permitir una gestión más eficiente del uso de los recursos radio (como por ejemplo información para reducir interferencias entre eNodeBs) así como tráfico de los usuarios del sistema cuando estos se desplazan de un eNodeB a otro durante un proceso de *handover*.

2.4.3. Protocolos

La estructura de protocolos utilizada en E-UTRAN para soportar las interfaces S1 y X2 establece una separación entre la capa de red radio (Radio Network Layer, RNL) y la capa de red de transporte (Transport Network Layer, TNL), tal como ya introdujo la red UMTS. Esta descomposición tiene como objetivo aislar las funciones que son específicas del sistema de comunicaciones móviles (UMTS o LTE), de aquellas otras que dependen de la tecnología de transporte utilizada (e.g., IP, ATM). De esta forma, los protocolos específicos de la red de acceso radio constituyen la capa RNL mientras que la capa TNL alberga los protocolos utilizados para el transporte de la información de la capa RNL entre las entidades de la red. En la figura3 se ilustra la arquitectura de protocolos de las interfaces S1 y X2 y la separación entre las capas TNL y RNL en E-UTRAN.

Figura 8. **Protocolos de las interfaces S1 (izquierda) y X2 (derecha)**



Fuente Revista Telem@tica. Vol. 12. No. 3, septiembre-diciembre, 2013.

Tanto el plano de usuario de la interfaz S1 (S1-U) como el de la interfaz X2 utilizan el protocolo de encapsulado GTP-U (GPRS Tunneling Protocol User Plane) para el envío de paquetes IP de usuario. El protocolo GTP-U es un protocolo heredado de GPRS que en las redes GSM y UMTS se utiliza dentro del dominio de paquetes de la red troncal (e.g., en la interfaz entre SGSN y GGSN), así como en el plano de usuario de la interfaz Iu-PS de la red de acceso UTRAN. En las interfaces S1-U y X2 el protocolo GTP-U se transporta sobre UDP/IP y fundamentalmente se utiliza para multiplexar los paquetes IP de múltiples usuarios (los paquetes IP de un determinado servicio portador se encapsulan con una determinada etiqueta identificador de túnel), dada su gran relevancia en el contexto de las redes 3GPP. Finalmente, es importante destacar que los planos de usuario de ambas interfaces no contemplan mecanismos de entrega garantizada para la transferencia de los paquetes de usuario, ni tampoco mecanismos de control de errores o control de flujo. Respecto al plano de control de la interfaz S1 (S1-MME o S1-C), la capa de red

radio consiste en el protocolo S1-AP (S1 - ApplicationPart). Este protocolo es el que sustenta los procedimientos soportados en la interfaz S1 (establecimiento de servicios portadores en el eNB, control del *handover*, *paging*, etc.). La transferencia de los mensajes de señalización del protocolo S1-AP entre eNBs y MMEs se realiza mediante el servicio de transferencia fiable que ofrece el protocolo de transporte Stream Control Transmission Protocol (SCTP).

SCTP es un protocolo de transporte (al igual que otros protocolos como TCP y UDP) de propósito general que fue concebido originariamente para el envío de señalización de redes telefónicas sobre redes IP. SCTP hereda muchas de las funciones contempladas en TCP a la vez que introduce importantes mejoras encaminadas a proporcionar mayor robustez y versatilidad en la transferencia de diferentes tipos de información. En particular, al igual que TCP, SCTP dispone de mecanismos de control de flujo y de congestión en la conexión, denominada asociación en SCTP. Por otro lado, SCTP incorpora soporte para *multihoming* (las asociaciones soportan la transferencia a través de múltiples caminos entre los nodos participantes, es decir, los nodos participantes pueden disponer de múltiples direcciones IP), *multistreaming* (múltiples flujos pueden enviarse en paralelo en el seno de una misma asociación) y el envío de la información se estructura con base en mensajes (a diferencia del protocolo TCP que trata la información como una secuencia de bytes). Estas nuevas capacidades son las que hicieron que en 3GPP se optara por la utilización de este protocolo, en lugar de TCP, para implementar el plano de control de las interfaces S1 y X2 de E-UTRAN.

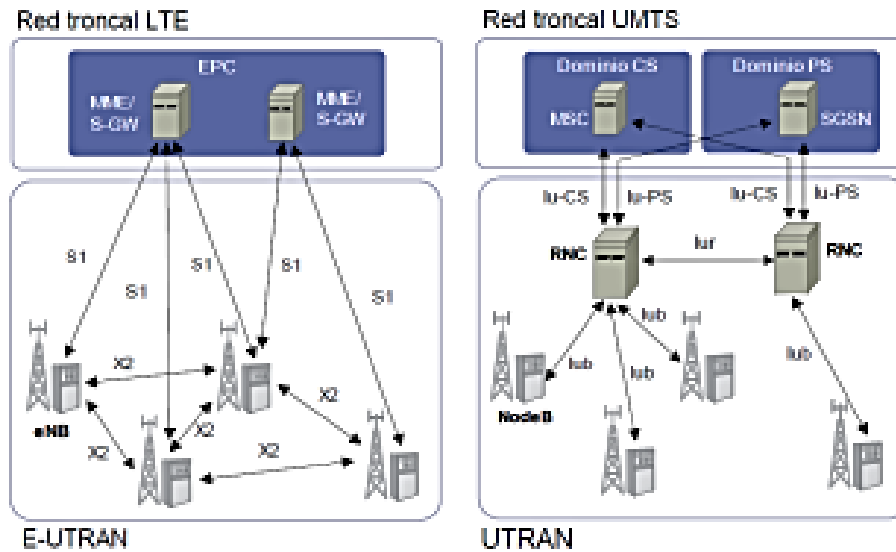
2.4.4. Comparación entre E-UTRAN Y UTRAN

Las redes de acceso anteriores a E-UTRAN se basan en una arquitectura jerárquica donde las funciones de la red de acceso se distribuyen en dos tipos

de nodos: estaciones base (denominados Nodos B en UTRAN) y equipos controladores de estas estaciones base (denominados RNC en UTRAN). La arquitectura de UTRAN se especifica en el documento 3GPP TS25.401. En esta arquitectura jerarquizada, los equipos controladores albergan el plano de control de la interfaz radio (señalización de control del enlace radio), así como múltiples funciones del plano de usuario (algunas funciones de la capa de acceso al medio, control de enlace, compresión de cabeceras, etc.). Por otro lado, las estaciones base se ocupan principalmente de las funciones de transmisión radio (procesado de capa física) y su operación se gestiona de forma remota desde los equipos controladores. La interconexión entre estaciones base y controladores se realiza mediante una interfaz denominada Iu, de forma que la topología de red resultante a nivel lógico es una topología en forma de estrella. Los equipos controladores también pueden conectarse entre sí mediante interfaces específicas como la interfaz Iu que, en el caso de UTRAN, permite la explotación del mecanismo de macrodiversidad entre dos Nodos B que se encuentren conectados a RNCs diferentes. La interconexión de la red de acceso a la troncal se realiza a través de los equipos controladores mediante las interfaces Iu-PS, entre RNCs y los nodos SGSNs del dominio de paquetes, y Iu-CS, entre RNCs y las centrales de conmutación MSC del dominio de circuitos.³

³ NÚÑEZ, Coral. *Diseño de una red de nueva generación LTE-A para una zona urbana en Bogotá bajo el estándar 3gpp y la recomendación ITU-R M.1457*. p 62.

Figura 9. Comparación de la arquitectura de red de E-UTRAN y UTRAN



Fuente NÚÑEZ, Coral. *Diseño de una red de nueva generación LTE-A para una zona urbana en Bogotá bajo el estándar 3gpp y la recomendación ITU-R M.1457*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Sistemas e Industrial. P. 16

Tabla I. Entidades de red e interfaces de e-trun

Entidades de red	Denominación	Descripción
	Evolved NodeB (eNB)	Estación de la red de acceso E-UTRAN
Interfaces	Denominación	Entidades de red asociadas
	E-UTRAN Uu (también denominada LTE Uu o interfaz de radio)	eNB - UE
	X2	eNB - eNB
	S1-MME	eNB - EPC (MME)
	S1-U	eNB - EPC (S-GW)

Fuente elaboración propia.

2.5. Red troncal evolucionada de paquetes: EPC

La red EPC debe tener interfaces con LTE y puede estar conectado a otras redes, como redes de segunda y tercera generación. EPC debe cooperar con el IMS. Los datos de usuario pueden ir a través del P-GW y sobre una red de Core de paquetes GPRS por medio de la interfaz S4. Otras interfaces hacia el GPRS Packet Core son S3 y S6d. El EPC puede estar conectado a una red CDMA2000 por medio de las interfaces S103, S101, S2a y Gxa. Por medio de la capa de conectividad del IMS el EPC se conecta a redes WLAN, acceso de banda ancha por cable, PSTN e Internet. Las capas superiores del EPC implican la capa de control y la capa de servicio del IMS. Otros nodos que se encuentran interconectados son el P-GW, PCRF y HSS.

2.5.1. Arquitectura de EPC

El diseño de la red troncal EPC ha sido concebido principalmente para proporcionar un servicio de conectividad IP (evolución del servicio GPRS) mediante una arquitectura de red optimizada que permite explotar las nuevas capacidades que ofrece la red de acceso E-UTRAN.

2.5.2. Entidades de red e interfaces

S6a es la interfaz entre el MME y HSS. Esta interfaz es usada para intercambiar datos relacionados con la ubicación del UE y la administración del suscriptor. El principal servicio provisto al suscriptor es la capacidad de transferencia de datos dentro de toda el área de servicio. El MME informa al HSS de la ubicación de un UE administrado informando la última ubicación. El HSS envía al MME todos los datos necesarios para soportar el servicio al UE. El intercambio de datos se realizará cuando un suscriptor requiere un servicio

particular, cuando quiere cambiar algunos datos enlazados a su suscripción o cuando algunos parámetros de suscripción son modificados por medios administrativos.

- Interfaz S6d: esta es la interfaz entre el SGSN y el HSS, es usada para intercambiar datos relacionados con la ubicación del UE y la administración del suscriptor. El SGSN informa al HSS de la última ubicación de un UE. También el HSS envía al SGSN todos los datos necesarios para soportar el servicio al suscriptor, con procedimientos semejantes a la interfaz S6a.
- Interfaz S11: esta interfaz es usada para soportar la movilidad y la administración de portadoras entre el MME y el S-GW.
- Interfaz S10: esta interfaz es usada para soportar la información de usuario transferida y la reubicación de MME soportada por los MME.
- Interfaces S5/S8: estas son las interfaces entre el S-GW y el P-GW. Estas interfaces proveen el soporte para funciones de servicios de datos hacia usuarios finales durante casos de *roaming* y *nonroaming*, por ejemplo S8 es la variante de S5 para el inter PLMN.
- Interfaz S3: interfaz entre el MME y SGSN. Esta interfaz permite el intercambio de información de usuario y portadoras para la movilidad de acceso inter 3GPP en estado *idle* o estado activo.
- Interfaz S4: esta es la interfaz entre el S-GW y el SGSN. Esta provee soporte de control y movilidad entre el GPRS Core y la función de anclaje 3GPP del S-GW. Adicionalmente si un Direct Tunnel no ha sido establecido, esta interfaz proveerá el *tunnelling* del User Plane.
- Interfaz SGs: esta interfaz se encuentra entre la MSC/VLR y el MME. Es usada para la administración de la movilidad y los procedimientos de *paging* entre el EPS y el dominio CS. La interfaz SGs es usada para proveer el *fallback* para los servicios de localización (LCS) y servicios

suplementarios independientes de llamada (SS), se usa para la entrega de SMS originados y destinados sobre EUTRAN cuando no se usa SMSIP. La señalización en esta interfaz usa SCTP como protocolo de transmisión y el protocolo de aplicación SGsAP para el intercambio de mensajes entre el VLR y el MME.

- Interfaz Sv: esta interfaz puede ubicarse entre una MSC 3GPP y un MME o un SGSN. Esta interfaz tiene un Sv *reference point* que provee soporte al SRVCC para funciones como el envío de vuelta de mensajes de relocalización entre MME o SGSN y la MSC.

2.5.3. Protocolos

EPC (Evolved Packet Core). La interfaz X2 permite la interconexión uno a uno entre eNBs. Mientras que la interfaz S1 logra la conexión de varios eNBs a MME o SGW (ver figura 3.4). La conexión entre estaciones bases eNBs ya no se realiza a través de un controlador de radio (RNC) como en UMTS. Todas las funciones del RNC se incorporan al eNB. De esta forma el control de los recursos de radio y la comunicación entre eNB cercanas es mucho más directa. Las redes LTE separan en dos planos la transferencia de datos de usuario y de control en la interfaz de radio. En el plano de usuario circulan los datos del usuario, permitiendo la distribución y procesamiento de los servicios y aplicaciones en el terminal móvil, mientras que en el plano de control se distribuye y procesa la información de control propia del sistema, permitiendo la supervisión de la red. Esta separación entrega un mayor control de los datos y una mejor calidad de tráfico cuando la red está congestionada. Cada uno de estos planos posee una pila de protocolos que permite realizar las diversas funciones de cada bloque de la arquitectura de red.

2.5.4. Configuraciones de la red EPC

La EPC es la unidad encargada de proporcionar el control y el transporte los servicios de la red.

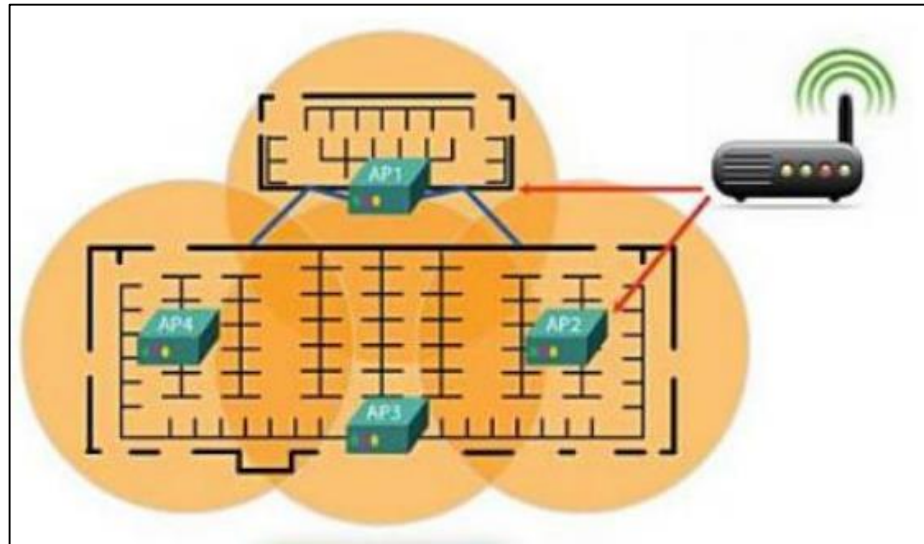
2.5.5. Soporte de itinerancia (*roaming*)

La itinerancia, más conocida por su término en inglés *roaming*, es un concepto que define la capacidad de un dispositivo inalámbrico para poder desplazarse de una zona de cobertura a otra. Cada zona de cobertura está gobernada por un punto de acceso diferente. El concepto de *roaming* o itinerancia, cuando es utilizado en las redes inalámbricas, significa que el dispositivo cliente puede desplazarse e ir registrándose en diferentes bases o puntos de acceso, sin perder en ningún momento acceso a la red.⁴

Para que esta itinerancia sea posible, tiene que haber una pequeña superposición en las coberturas de los puntos de acceso, de tal manera que los usuarios puedan desplazarse y siempre tengan cobertura. Los puntos de acceso incorporan un algoritmo de decisión que, con base al consumo y distancias, deciden cuando una estación debe desconectarse de un punto de acceso y conectarse a otro más favorable. La figura muestra la configuración típica de centros y *campus* donde existen diferentes puntos de acceso, que van proporcionando a los usuarios conexión al desplazarse por las diferentes zonas.

⁴ OCHOA, M. *Manual para establecer la certificación del servicio de roaming internacional de voz sobre una red GSM*. p 36.

Figura 10. Punto de acceso inalámbrico



Fuente: OCHOA, M. *Manual para establecer la certificación del servicio de roaming internacional de voz sobre una red GSM.* p 26

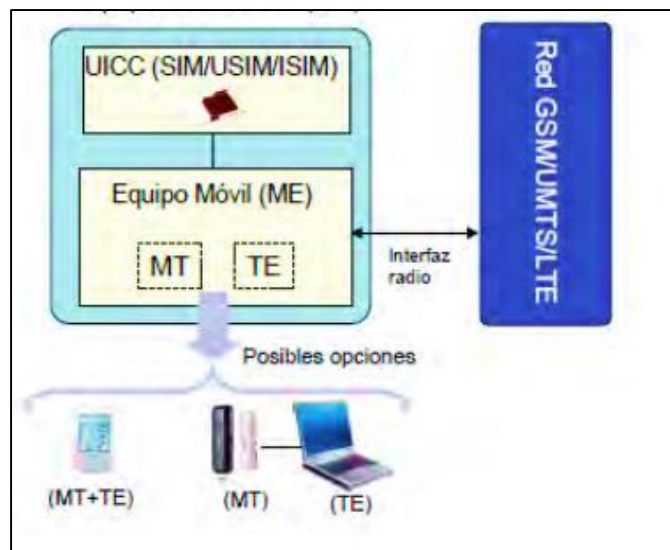
2.6. IP Multimedia Subsystem (IMS)

El Subsistema Multimedia IP (IMS) es un concepto para una red integrada de operadores de telecomunicaciones que facilitaría el uso de IP (Protocolo de Internet) para comunicaciones de paquetes en todas las formas conocidas a través de redes inalámbricas o líneas terrestres. Ejemplos de tales comunicaciones incluyen telefonía tradicional, *fax*, correo electrónico, acceso a Internet, servicios *web*, voz sobre IP (VoIP), mensajería instantánea (IM), sesiones de videoconferencia y video a pedido (VoD).

2.7. Equipos de usuario

La arquitectura funcional de un equipo de usuario en el sistema LTE es la misma que en su momento se definió para los sistemas GSM y que se adaptó posteriormente para UMTS. El equipo de usuario (User Equipment, UE) contiene dos elementos básicos: un módulo de suscripción del usuario (SIM/USIM) y el equipo móvil propiamente dicho (Mobile Equipment, ME). Adicionalmente, las funciones del equipo móvil se agrupan en dos entidades funcionales: la terminación móvil (Mobile Terminal, MT) y el equipo terminal (Terminal Equipment, TE). La figura muestra el equipo de usuario LTE.⁵

Figura 11. Equipo de usuario



Fuente: ARRESE, Baltazar. *Diseño de una red LTE*. p 96

⁵ ARRESE, Baltazar. *Diseño de una red LTE*. p 96.

3. MARCO DE GESTIÓN DE SESIONES, MOVILIDAD Y SEGURIDAD EN LTE

3.1. Gestión de sesiones

Se hace una descripción de la gestión de servicios para la movilidad y seguridad en LTE.

3.1.1. Servicio de conectividad ip: conexiones PDN

El Packet Data Network Gateway es también nombrado PDN GW o simplemente P-GW. Este es el punto de interconexión entre el EPC y las redes IP externas. Estas redes son llamadas PDN. El P-GW enruta los paquetes hacia y desde las PDN. Adicionalmente desarrolla varias funciones como el direccionamiento IP, la colocación de prefijo IP, control de políticas y el *charging*. 3GPP especifica los Gateway del EPC independientemente, pero en la práctica estos podrían combinarse en una sola caja por los proveedores de red. El P-GW es el Gateway que termina la interfaz SGi hacia las PDN.

Cuando un UE está accediendo a múltiples PDN, puede haber más de un P-GW para ese UE. Sin embargo, una mezcla de conectividad de las interfaces S5/S8 y Gn/Gp no es soportada para ese UE simultáneamente. El P-GW provee conectividad a las PDN para los UE que son solo de GERAN/UTRAN y para UE de E-UTRAN capaces de usar cualquier acceso 3GPP. La conectividad para los UE de E-UTRAN es solo sobre la interfaz S5/S8.

3.1.2. Servicio portador EPS

La red de telefonía móvil que cuenta con la tecnología LTE está definida tanto por 3GPP como EPS. El EPS está basado puramente en IP, los servicios de tiempo real y servicios de datos son llevados a cabo por el protocolo IP. EPS es considerado como un sistema de arquitectura simple y plana, se caracteriza por el hecho que únicamente soporta paquetes de datos y está basado en IP. El EPS se divide en dos partes importantes, la red de acceso LTE y la red de *core* EPC con una arquitectura SAE. EPS es la evolución de los sistemas de telefonía GSM y UMTS para el dominio PS y sus redes de acceso y *core* forman parte de esta evolución.⁶

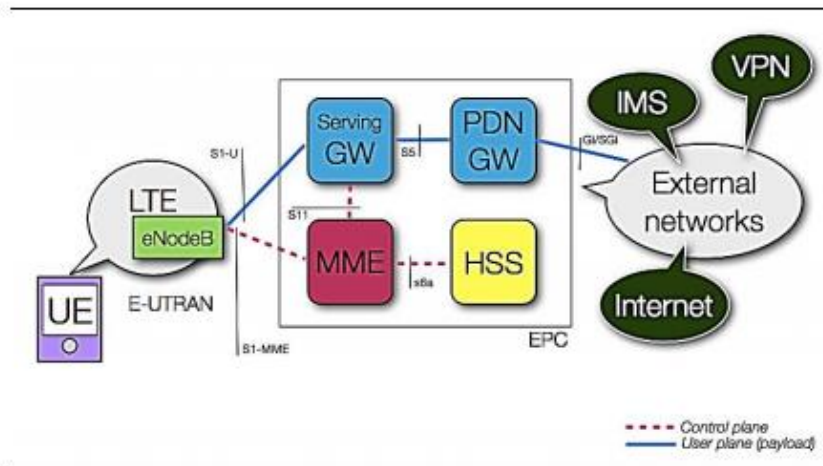
En el sistema EPS el equipo terminal del usuario sigue llamándose UE y se caracteriza por que la dirección IP de un UE es asignada cuando el terminal es encendido y se libera cuando es apagado. En EPS la tecnología de la red de acceso LTE también es conocida como E-UTRAN y la red de *core* EPC es también conocida como SAE. Sin embargo, LTE y SAE son artículos de trabajo de 3GPP, mientras E-UTRAN y EPC son las redes actuales de acceso y *core*. En el EPS un UE se comunica por medio de la interfaz de aire con un eNodeB, también llamado RBS, y la red de acceso E-UTRAN consiste de varios eNodeB. Los eNodeB están habilitados para comunicarse entre sí y también están conectados al EPC.

LTE consiste de los eNodeB, los cuales finalizan todas las funciones del plano de usuario vistas por el terminal, por ejemplo Radio Bearer Control, Connection Mobility y el Scheduling para el *uplink* y el *downlink*. Dos eNodeB se conectan por medio de la interfaz X2, la cual se divide en X2 *user plane* y X2

⁶ ARRIAGA. *Descripción del funcionamiento de una red de telefonía LTE*. p 55.

control plane. Los eNodeB están conectados al S-GW por medio de la interfaz S1-UP y al MME por la interfaz S1-CP.

Figura 12. **EPS**



Fuente: *IP multimedia subsystem*. http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/83/lms_overview-2.png. Consulta: diciembre 2017.

3.1.3. **Modelo de QoS**

Otro parámetro que puede ser definido en los equipos de la red de telefonía móvil es la calidad de servicio (QoS), de acuerdo a la función del equipo en la red es posible ajustar ciertos parámetros para dar alta prioridad a servicios como las aplicaciones en tiempo real del PS y dar prioridad baja a servicios como *e-mail* o mensajería de texto, que demandan menos recursos de la red y que pueden soportar cierto retraso de entrega. Con el análisis de QoS se establecen prioridades en la red LTE para establecer portadoras dedicadas para los servicios principales y portadoras por defecto a los servicios

secundarios. Estos parámetros pueden ser ajustados en los equipos y luego se mide su rendimiento por medio de los KPI.

3.1.4. Control del servicio de conectividad: sistema PCC

3GPP ha especificado un subsistema que permite controlar el servicio de conectividad IP ofrecido por la red LTE. Dicho subsistema de control recibe el nombre de PCC (Policy and Charging Control) y está concebido para cubrir dos funciones básicas:⁷

- Control mediante políticas de uso (*policy control*) de los servicios portadores EPS. En particular, el control mediante políticas de uso gestionado desde el sistema PCC se centra en dos aspectos concretos: control de los parámetros de QoS del servicio portador EPS (denominado como QoS, control en las especificaciones 3GPP) y control de paso del tráfico a través de la pasarela P-GW (denominado como *gating control* en las especificaciones). Ambos aspectos se desarrollan en detalle más adelante.
- Control de la tarificación del servicio de conectividad, incluyendo el control de servicios prepago que requieren un sistema de verificación de crédito *online*.

A través del subsistema PCC se articula la interacción del servicio de conectividad proporcionado por LTE con las plataformas que sustentan los servicios finales (IMS). De esta forma, los servicios portadores EPS que se establezcan en la red LTE están en consonancia con las necesidades de transmisión de los servicios finales, cuya señalización se lleva a cabo de forma

⁷ 3GPP TS 23.401. *General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access*. Consulta: diciembre 2017.

transparente a través de la red LTE. La determinación de las necesidades de QoS a través del sistema PCC hace que no sea necesario que sea el terminal el que comunique a la red el trato de QoS que espera recibir de ella. Este planteamiento es opuesto al que fue adoptado inicialmente en GPRS, donde las características de QoS de los servicios portadores (contextos PDP) se señalizan desde el equipo de usuario en el momento de su activación. Esta opción se conoce como modelo de QoS iniciado por el móvil y conlleva la necesidad de que en el terminal exista una API (Application Program Interface), a través de la cual las aplicaciones puedan solicitar QoS. En cambio, el modelo de QoS propiciado por el subsistema PCC se conoce como modelo de QoS iniciado por la red de forma que, a través de mecanismos de la propia red, esta puede conocer las necesidades de QoS de las aplicaciones y establecer los servicios portadores adecuados. La posibilidad de activar servicios portadores desde la red con los parámetros de QoS apropiados (y controlados por el operador) fue una de las mejoras introducidas en las últimas versiones del servicio GPRS en redes UMTS y se ha convertido en el modelo fundamental utilizado en la red LTE

El subsistema PCC no es específico de la red LTE sino que constituye un subsistema de control transversal que permite gestionar también el servicio de conectividad IP ofrecido por otros tipos de redes de acceso. Por este motivo, en las especificaciones del subsistema PCC se habla de forma genérica de redes IP-CAN (IP Connectivity Access Network). Ejemplos de redes IP-CAN son las redes troncales EPC y GPRS, junto con las diferentes redes de acceso de radio que admiten. Además, la arquitectura PCC contempla que una determinada red IP-CAN soporte diferentes tecnologías de acceso, cuyas características pueden ser tenidas en cuenta a la hora de gestionar las sesiones. En el caso concreto de la red troncal EPC, la red de acceso puede ser E-UTRAN o cualquiera de las otras redes de acceso 3GPP y no 3GPP soportadas, de forma que el

subsistema PCC dispone de mecanismos para conocer la red de acceso en uso y puede actuar en consecuencia (no autorizar el establecimiento de la componente de video de un servicio IMS cuando el terminal no se encuentre en E-UTRAN).

Dada su transversalidad, el subsistema PCC denomina sesión IP-CAN a la asociación formada por una dirección IP, una identidad de usuario (si está disponible) y un identificador de red PDN (APN). En el caso de la red LTE el concepto de sesión IP-CAN es equivalente al de conexión PDN comentado en el apartado 3.2.1. Asimismo, el tráfico que fluye asociado a una misma sesión IP-CAN, el subsistema PCC puede disociarlo en múltiples flujos de paquetes IP, denominados como Service Data Flows (SDFs). Un SDF constituye la unidad mínima de agregación de tráfico sobre la que se aplican las políticas de uso y tarificación del sistema PCC. A diferencia de la asociación directa que existe entre sesión IP-CAN y conexión PDN en una red LTE, es importante matizar que no existe una correspondencia directa entre los SDFs de una sesión IP-CAN y los servicios portadores EPS de la conexión PDN, sino que cada servicio portador EPS puede transportar uno o múltiples SDFs (SDFs que tengan la misma QoS pueden transportarse en un único servicio portador EPS). En la Figura 2-22 se ilustra la relación entre los conceptos IP-CAN, SDF, conexión PDN y servicios portadores EPS.

3.1.5. Procedimientos de gestión de sesiones

En el sistema LTE la activación/modificación/desactivación de los servicios portadores EPS se controla desde la propia red con base en los datos de suscripción del usuario y/o a las políticas de uso recibidas desde el sistema PCC. Es importante recalcar que este planteamiento es diferente al seguido en el servicio GPRS de redes UMTS, en que la activación de los servicios

portadores la inicia el terminal. Los procedimientos principales relacionados con la gestión de sesiones son:

- Procedimiento de registro (Network Attach). A través de este procedimiento se establece el servicio de conectividad IP que ofrece la red LTE. Existen diferentes variantes del procedimiento de registro en función de si la red de acceso utilizada es E-UTRAN o cualquiera de las otras redes de acceso alternativas 3GPP y no 3GPP contempladas.
- Procedimiento de petición de servicio (Service Request). El modelo de servicio ofrecido por la red LTE permite que un usuario en modo idle (i.e. sin una conexión a E-UTRAN) mantenga abiertos los servicios portadores EPS en la red troncal. Este procedimiento permite una reactivación rápida del plano de usuario cuando el terminal pasa de *idle* a conectado.
- Petición de conexión PDN solicitada por el terminal (UE Requested PDN Connectivity). El sistema LTE permite el equipo de usuario inicie el procedimiento de establecer una conexión PDN adicional a la conexión PDN establecida en el procedimiento de registro.
- Activación, modificación y desactivación de los servicios portadores EPS dedicados (EPS Bearer Activation/Modification/Deactivation). La gestión de los servicios portadores EPS dedicados es uno de los pilares de la gestión de sesiones en la red LTE. La activación y modificación de estos servicios puede estar vinculada al control dinámico de QoS ofrecido por el subsistema PCC.⁸
- Modificación del servicio portador solicitada por el terminal (UE *requested bearer resource modification*). Este procedimiento permite que el terminal pueda solicitar cambios en los servicios portadores que le ofrece la red.

⁸ 3GPP TS 23.122. *Non-Access-Stratum (NAS) functions related to Mobile Station (MS) in idle mode*. Consulta: diciembre 2017.

Los cambios pueden ser tanto un cambio de los parámetros de QoS como una modificación de los filtros de paquetes que determina la composición del tráfico agregado en un servicio portador. El procedimiento constituye una vía de escape al modelo general de activación de servicios portadores donde, tal como se ha comentado al principio de este apartado, es la red la que controla su activación y determina sus características. Si la solicitud de modificación realizada por un terminal es aceptada por la red, esta procede a iniciar los mecanismos pertinentes de activación, modificación y/o desactivación de los servicios portadores EPS (el control sigue teniéndolo la red, pero en este caso, atendiendo a una petición proveniente del terminal).

3.2. Gestión de movilidad

La gestión de movilidad se refiere a los mecanismos con los que cuenta el sistema LTE para que los usuarios puedan acceder y recibir servicios desde cualquier ubicación geográfica donde el sistema disponga de cobertura. Asimismo, la gestión de movilidad también abarca los mecanismos utilizados en el sistema LTE para poder mantener las conexiones de sus usuarios activas aun cuando estos puedan cambiar de estación base debido a su movilidad (mecanismos de *handover*).

3.2.1. Marco de gestión de movilidad

El sistema LTE especifica un modelo de movilidad (denominado modelo EMM, EPS Mobility Management) con dos posibles estados que representan

dos situaciones de accesibilidad en las que puede encontrarse un usuario del sistema. Los dos estados del modelo EMM son 4:⁹

- Estado no registrado (EMM-*Deregistered*). En este estado, el usuario no se encuentra visible en el sistema LTE y, por tanto, no tiene acceso a los servicios del sistema. En este estado, el sistema LTE no dispone de ninguna información relativa a la localización del usuario. La situación más habitual que conlleva que un usuario se encuentre en este estado es que el terminal LTE está apagado.
- Estado registrado (EMM-*Registered*). En este estado, el usuario está operativo en el sistema LTE y, por tanto, tiene acceso a sus servicios a través de un equipo de usuario. En este estado, la red dispone de información de localización del equipo de usuario con la resolución de, al menos, una lista de áreas de seguimiento (*tracking arealist*). Asimismo, en este estado el equipo de usuario mantiene, al menos, una conexión PDN activa y tiene asignado un nodo MME de la red troncal encargado de realizar su seguimiento.
- Estado desconectado (ECM-*Idle*). En este estado, el terminal no tiene establecida una conexión de señalización con ninguna entidad MME. La existencia de este estado responde básicamente a la necesidad de disponer de un modo de operación de bajo consumo que permita conseguir un modelo de funcionamiento “alwayson” mediante la posibilidad de conmutar de forma rápida entre este estado y el siguiente estado conectado en el que el terminal podría enviar/recibir datos.
- Estado conectado (ECM-*Connected*). En este estado, el equipo de usuario tiene establecida una conexión de señalización con una entidad MME de la EPC. Dicha conexión de señalización se compone de una

⁹ 3GPP TS 23.122. *Non-Access-Stratum (NAS) functions related to Mobile Station (MS) in idle mode*. Consulta: diciembre 2017.

conexión RRC en E-UTRAN y de una conexión a través de la interfaz S1-MME entre la red de acceso E-UTRAN y la entidad de la red troncal MME. El envío/recepción de datos de usuario siempre se realiza en este estado.

3.2.2. Gestión de la localización

La red debe disponer de mecanismos para conocer con un determinado nivel de resolución la localización de los terminales que se encuentren registrados (estado EMM-Registered) pero que no tengan establecida una conexión con ninguna estación base (estado ECM-Idle). LTE define el concepto de Área de Seguimiento (Tracking Area, TA) para gestionar la información de localización. Un TA agrupa a un conjunto de eNBs de forma que la información de localización disponible en la red troncal EPC de un determinado equipo de usuario solamente se conoce con base en la resolución proporcionada por tales agrupaciones. La identidad de un TA se denomina TAI (Tracking Area Identifier) y se difunde a través de los mensajes de información de sistema enviados en los canales de *broadcast* de los eNBs que integran una TA. Un eNB solo puede pertenecer a una TA de una red troncal EPC, es decir, no hay solapes entre diferentes TAs.

El equipo de usuario, a partir del identificador TAI recibido, es el encargado de comunicar a la red en qué TA se encuentra accesible mediante los mecanismos de Network Attach y de Tracking Area Update. De esta forma, cuando la red necesita contactar con el terminal, el mensaje de aviso (*paging*) se difunde a través de todas las estaciones base que integran el TA en que se encuentra localizado el terminal¹⁰. La selección de qué estaciones base

¹⁰ 3GPP TS 33.210. *3G Security; Network Domain Security; IP network layer security*. Consulta: diciembre 2017.

integran cada una de las TAs es un aspecto de ingeniería que plantea un compromiso entre la carga de señalización que originan los mecanismos de TAU y la carga asociada al procedimiento de aviso de los equipos de usuario: si las TAs están formadas por pocos eNBs, el número de accesos a la red por parte de los terminales para actualizar su localización aumenta. Un elevado número de accesos repercute tanto en la carga de la red como en el consumo de baterías de los equipos de usuario.

En cambio, cuando la red debe avisar a un equipo de usuario, el procedimiento de *paging* puede ser más selectivo ya que afecta a pocas celdas. La gestión de la localización mediante áreas de seguimiento es un planteamiento ya utilizado en redes anteriores como UMTS y GSM. En particular, en dichas redes la localización de terminales registrados en el dominio de circuitos se realiza mediante el concepto de área de localización (Location Area, LA) y mediante la definición de áreas de rutado (Routing Area, RA) en el dominio de paquetes. Al igual que las TA de LTE, las agrupaciones LA y RA tampoco presentan solape y su determinación plantea los mismos compromisos esgrimidos anteriormente.

3.2.3. Mecanismo de *handover*

El mecanismo de *handover* se utiliza para gestionar la movilidad de los equipos de usuario que se encuentran en modo activo (ECM-Connected). Conceptualmente, el *handover* es un mecanismo que permite que las conexiones que tengan establecidas los equipos de usuario sobrevivan al cambio de estación base que proporciona el acceso a la red. Desde la perspectiva del servicio ofrecido al usuario, los requisitos de diseño de un mecanismo de preparación y ejecución del *handover* se plantean en términos

del tiempo de interrupción o tasa de pérdida de datos que puede aparecer durante la ejecución del cambio.

En este sentido, en los requerimientos de diseño del sistema LTE, se establece que la degradación de prestaciones en la que puede incurrirse durante la realización de un *handover* debe ser menor o igual a la existente en redes de circuitos GSM. Asimismo, entre los requerimientos de velocidades físicas de los terminales se apuntan velocidades de hasta 350 km/h, aunque se indica que la red esté realmente optimizada para trabajar en el rango 0-15 km/h. Todas estos requerimientos hacen que el diseño del mecanismo de *handover* en LTE constituya un elemento clave del sistema¹¹. Para la consecución de tales requisitos, la implementación del mecanismo de *handover* en LTE se sustenta en los siguientes principios básicos:

- El mecanismo de *handover* especificado en LTE se controla desde la red (la red decide el cambio de estación base) teniendo en cuenta medidas enviadas desde los equipos de usuario (*handover* controlado por la red y asistido por el terminal). Concretamente, la decisión de llevar a cabo un cambio de eNB de un terminal en modo conectado, la toma el propio eNB con el que el equipo de usuario mantiene una conexión RRC activa (criterios y algoritmos de decisión), atendiendo a que la función que controla las decisiones de *handover* constituye una de las funciones clave para la gestión eficiente de los recursos radio en E-UTRAN.
- Una vez tomada la decisión sobre la necesidad de realizar un *handover*, la propia red se encarga de reservar los recursos necesarios en el eNB destino en aras de reducir el tiempo de interrupción (durante este tiempo de preparación el terminal sigue conectado al eNB antiguo), así como el

¹¹ 3GPP TR 25.913. *Requirements for evolved UTRA and evolved UTRAN*. Consulta: diciembre 2017.

número de intentos de *handover* fallidos. Una vez la red garantiza que el terminal puede ser traspasado al nuevo eNB, la red ordena al terminal que ejecute el cambio. Este planteamiento se conoce popularmente como Make Before Break, en contraposición a otro planteamiento denominado Break Before Make, en que el terminal realizaría el cambio de eNB sin haberse efectuado ninguna reserva de recursos en el eNB destino.

- Durante la realización del proceso de *handover*, la propia red dispone de mecanismos para transferir los paquetes del usuario pendientes de transmisión en el viejo eNB hacia el eNB destino (mediante la utilización de la interfaz X2). Este planteamiento permite reducir el número de paquetes perdidos durante la ejecución de un *handover*. Nótese por ejemplo que, a diferencia de la red de acceso UTRAN basada en CDMA, el *handover* en E-UTRAN siempre es del tipo *hard-handover* (en contraposición al denominado *soft-handover* característico de sistemas CDMA). Un *hardhandover* significa que existe un tiempo de interrupción del servicio durante el cambio de estación base, necesario para adquirir la sincronización en la nueva base y obtener la primera asignación de recursos en ella (en sistemas CDMA, no se produce dicho tiempo de interrupción). En el momento en que un terminal conmuta entre estaciones base, todavía pueden seguir llegando paquetes IP a la estación base antigua, dado que el rutado en la infraestructura de la red todavía puede no haberse actualizado

3.2.4. Procedimientos de gestión de movilidad

La gestión de movilidad se refiere a los mecanismos con los que cuenta el sistema LTE para que los usuarios puedan acceder y recibir servicios desde cualquier ubicación geográfica donde el sistema disponga de cobertura.

Asimismo, la gestión de movilidad también abarca los mecanismos utilizados en el sistema LTE para poder mantener las conexiones de sus usuarios activas aun cuando estos puedan cambiar de estación base debido a su movilidad (mecanismos de *handover*).

3.3. Gestión de seguridad

Se describe a continuación el marco de seguridad para la red LTE:

3.3.1. Marco general de seguridad

La gestión de seguridad concierne a cómo la red LTE autentica y autoriza el uso de sus servicios a los usuarios, así como cuáles son los mecanismos utilizados para proporcionar confidencialidad e integridad de la información enviada tanto en la interfaz radio como en otras interfaces entre equipos de red. Los componentes y procedimientos básicos de la gestión de seguridad en LTE se tratan a continuación:

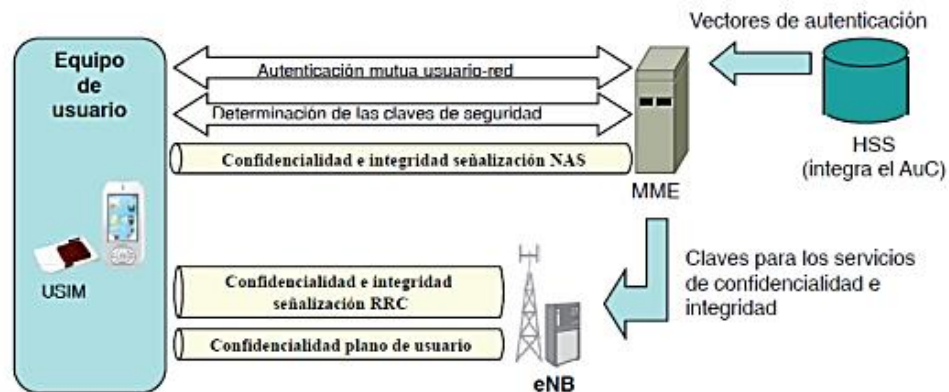
3.3.2. Seguridad de acceso a la red

La seguridad de acceso a la red LTE a través de una red de acceso E-UTRAN se compone de los siguientes elementos:

- Mecanismos para la autenticación mutua entre el usuario y la red. El procedimiento a través del cual se realiza la autenticación mutua, junto con la gestión de claves, se denomina EPS Authentication and Key Agreement (AKA).

- Mecanismos para la determinación de las claves secretas utilizadas en los algoritmos de cifrado para la provisión de los diferentes servicios de confidencialidad e integridad.
- Servicios de confidencialidad e integridad para la transferencia de la señalización NAS entre el equipo de usuario y la entidad MME de la red troncal EPC.
- Servicios de confidencialidad e integridad para la transferencia de la señalización del protocolo RRC entre el equipo de usuario y el eNB (el cifrado se realiza en la capa PDCP de la torre de protocolos radio).
- Servicios de confidencialidad para la transferencia de información en el plano de usuario entre el equipo de usuario y el eNB (el cifrado se realiza en la capa PDCP de la torre de protocolos de radio). Nótese que la información del usuario no dispone de un servicio de integridad, ya que, en caso de ser necesario, se considera un aspecto dependiente del servicio final en cuestión.

Figura 13. **Componentes de la seguridad de acceso a la red**



Fuente: 3GPP TS 33.210. 3G Security; Network Domain Security; IP network layer security.

Consulta: diciembre 2017.

3.3.3. Seguridad en la infraestructura de red

La solución planteada para proporcionar seguridad en las interfaces internas de la infraestructura de red basadas en torres de protocolos IP se denomina Network Domain Security for IP (NDS/IP) y se especifica en el documento 3GPP TS 33.210 [19]. NDS/IP establece los mecanismos de seguridad que pueden utilizarse para la transferencia segura de información entre los equipos que forman parte de la infraestructura de red de un mismo operador, así como entre los equipos que enlazan las redes de diferentes operadores. NDS/IP se ha diseñado para proteger los protocolos del plano de control, a través de los cuales se transporta la información más sensible (transferencia de datos de suscripción, vectores de autenticación, etc.). No obstante, la solución NDS/IP también es válida para proteger los protocolos de plano de usuario en las interfaces internas de la red (interfaces basadas en GTP-U). La solución NDS/IP se basa en la utilización de IPsec definido en IETF RFC4301.

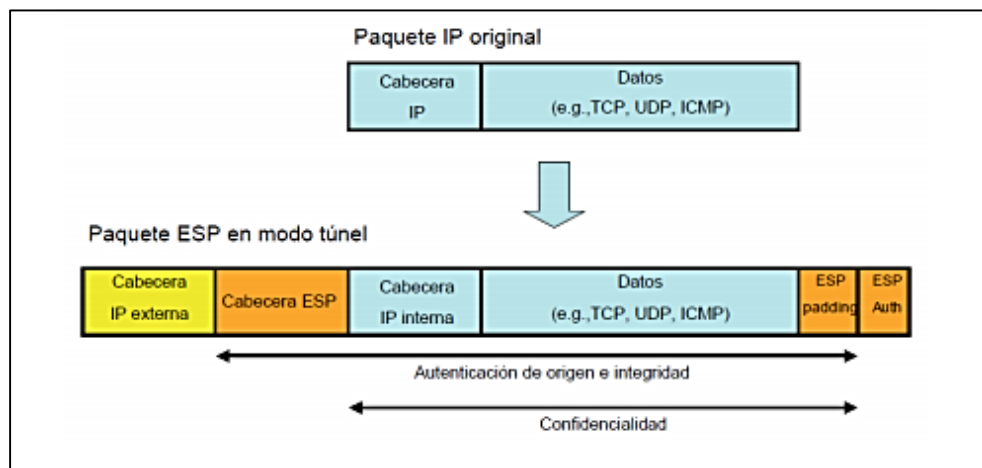
IPsec es una colección de protocolos y algoritmos para proporcionar seguridad en la capa de red, incluyendo la gestión de claves. En la solución NDS/IP, el protocolo de seguridad IPsec utilizado es ESP (Encapsulating Security Payload) definido en IETF RFC 4303.¹²

ESP permite ofrecer servicios de confidencialidad, integridad y autenticación del origen de datos. En este modo, el protocolo IPsec ESP permite establecer un túnel entre dos puntos de una red IP donde el paquete IP original se transporta encapsulado en otro paquete IP junto con cabeceras especificadas por el protocolo ESP. La dirección IP del paquete original se denomina dirección IP interna del túnel (*inneraddress*) y la dirección del paquete

¹² IETF RFC 4303. *IP Encapsulating Security Payload (ESP)*. Consulta: diciembre 2017.

ESP en modo túnel se refiere como dirección externa del túnel (*outeraddress*). El servicio de confidencialidad cubre el paquete IP original junto con una serie de *bits* de *padding* (relleno) que pueden ser necesarios en función del algoritmo de cifrado que se utilice (los algoritmos de cifrado suelen procesar la información en bloques de *bits* de tamaño fijo). Por otro lado, la integridad y autenticación del paquete IP original cifrado y la cabecera ESP se realiza mediante un *checksum* criptográfico que se añade al final del paquete ESP. Además del modo túnel representado en la figura, el protocolo ESP también soporta el modo transporte. A diferencia del modo túnel, el modo transporte no añade una cabecera externa adicional sino que utiliza la cabecera del paquete IP original (con lo que la cabecera no queda protegida por el servicio de confidencialidad, ya que esta debe ser procesada por los *routers* de la red).

Figura 14. **Formato de un paquete IPsec ESP en modo túnel 1**



Fuente: IETF RFC 4303. *IP Encapsulating Security Payload (ESP)*. Consulta: diciembre 2017.

3.3.4. Procedimientos de gestión de seguridad

La solución planteada para proporcionar seguridad en las interfaces internas de la infraestructura de red basadas en torres de protocolos IP se denomina Network Domain Security for IP.

4. PARÁMETROS DE SC-FDMA EMPLEADOS POR LTE

4.1. Estructuras con varias antenas

La diversidad en espacio es la primera estructura con varias antenas ampliamente usada en comunicaciones móviles. Se basa en el hecho de que un canal móvil se caracteriza por una respuesta impulsional aleatoria y variante no solo en el dominio temporal sino también en el dominio espacial. Así, considerando MR antenas en recepción suficientemente separadas, se puede conseguir a la salida de los MR canales formados entre la antena transmisora y las MR antenas receptoras, MR réplicas independientes de la misma señal transmitida.¹³ Una consecuencia de ello es que al combinar estas distintas réplicas, se puede conseguir a la salida de un combinador apropiado una nueva señal con un mayor nivel de potencia instantánea, y de este modo recuperar finalmente la señal de información modulada en mejores condiciones de relación entre potencia de señal y potencia de ruido.

4.1.1. Caracterización de las estructuras MIMO

La técnica MIMO (*multiple input multiple output*) se utiliza para aumentar la tasa de *bits* global a través de la transmisión de dos (o más) flujos de datos diferentes en dos (o más) antenas diferentes, utilizando los mismos recursos en frecuencia y tiempo, separados únicamente mediante el uso de diferentes señales de referencia, recibidas por dos o más antenas.

¹³ LO, T. *Maximal Ratio Transmission*. IEEE Transactions On Communications, October 1999. Consulta: diciembre 2017.

4.1.2. Formulación de las estructuras mimo

Se puede formular un sistema MIMO como un sistema de ecuaciones tal como:

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^{M_T} h_{i,j}(t) * S_j(t), \quad i = 1, 2, \dots, M_R,$$

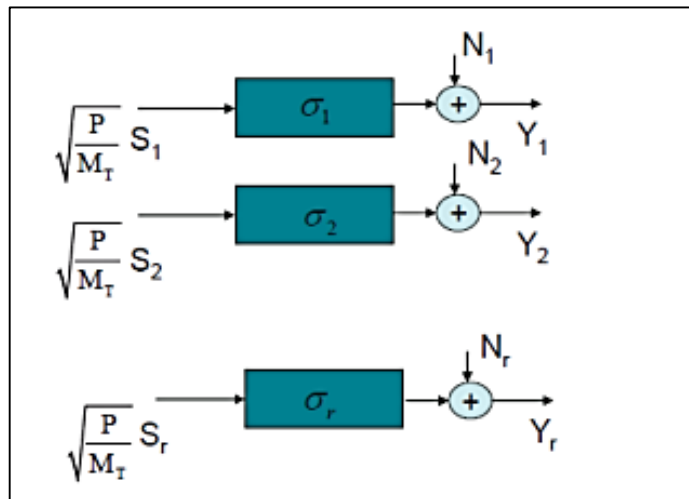
Donde $y_i(t)$ es la señal recibida en el extremo receptor a la salida de la antena i -ésima, $h_{i,j}(t)$ es la respuesta impulsional del canal móvil en el instante t entre la antena transmisora j -ésima y la antena receptora i -ésima, $S_j(t)$ es la señal de entrada a la antena transmisora j -ésima. Es posible observar como esta formulación es una generalización de las estructuras SIMO (una antena en emisión y M_R en recepción) y MISO (M_T antenas en transmisión y una antena en recepción), en los que $h_{i,j}(t) = h_{i,j}(t)$ para todos los caminos. Esta formulación también captura la situación más convencional de las estructuras SISO (Single Input Single Output, una antena en emisión y una antena en recepción), en este caso, el sistema de ecuaciones anterior se reduce a la formulación clásica para un canal móvil donde la señal de salida es la convolución de la señal de entrada y la respuesta impulsional del canal.

4.1.3. Capacidad de las estructuras MIMO

La capacidad de un canal de comunicaciones que contemple estructuras con varias antenas transmisoras y receptoras se puede obtener generalizando la expresión clásica de la capacidad de un canal C de ancho de banda B y relación señal a ruido γ introducida por primera vez por Shannon. El hecho de que las modernas técnicas de codificación y modulación permitan ya alcanzar velocidades de transmisión muy próximas al límite establecido por la capacidad

de un canal de comunicaciones, otorgan, si cabe, un mayor interés al conocimiento de esta expresión.

Figura 15. Esquema de una estructura MIMO



Fuente: MYUNG, H. *Single carrier FDMA for uplink wireless transmission*. p 45.

4.1.4. Precodificación

La capacidad máxima del sistema MIMO se obtiene cuando el emisor es capaz de conocer el valor H de la matriz de propagación vista en el receptor, que se denomina Channel State Information in the Transmitter (CSIT). Alternativamente, resulta suficiente si el emisor conoce la matriz V resultante de la descomposición SVD de la matriz H , para aplicar el proceso de precodificación.

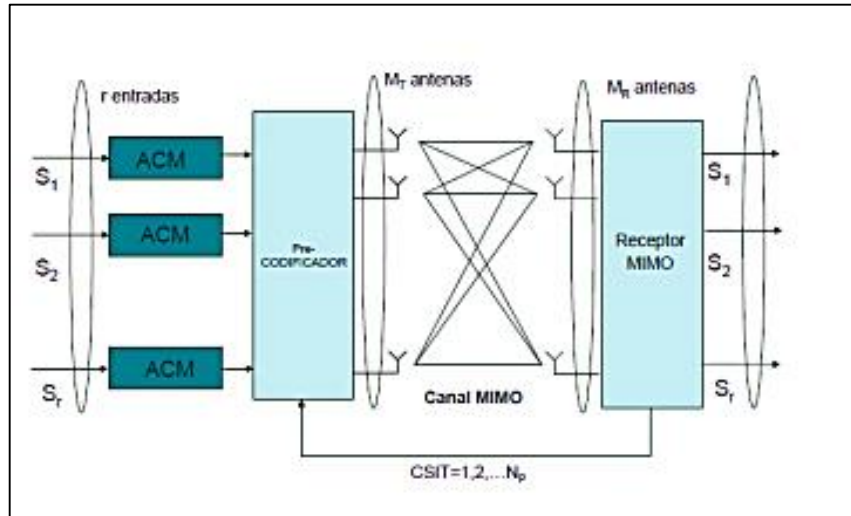
En LTE, con objeto de todavía disponer del estado del canal en transmisión (CSIT) se han habilitado estrategias subóptimas. Una de ellas es tener hasta un cierto número NP de matrices de precodificación guardadas en

transmisión, de manera que el receptor solo tiene que enviar cuál de las NP matrices preregistradas resulta la más conveniente. Esta estrategia reduce drásticamente el *overhead*, si bien a costa de aceptar un comportamiento con cierta degradación, pero aún aceptable¹⁴. Otros procedimientos similares son posibles y están ampliamente abordados en la literatura. Ciertamente con la paralelización en r canales, tal como en la descomposición SVD de la matriz H , cada canal está condicionado por una ganancia σ_i . Una optimización de la transmisión conduce entonces al uso de estrategias de modulación y codificación adaptativa que puede ser distinta en cada canal, de modo que los canales mejores que presenten σ_i elevadas tengan más niveles de modulación y menos redundancia de codificación y a la inversa para los canales peores que presenten σ_i pequeñas.

La figura ilustra un esquema general donde se capturan las ideas anteriores en relación a la precodificación, la realimentación del CSIT y las técnicas ACM previas por las que los trenes de datos de usuario se codifican con códigos de canal apropiados (e.g turbo códigos) y se modulan con las estrategias nQAM adecuadas al estado del canal. En la medida que en un sistema real la precodificación no es perfecta, entonces la paralelización en r canales tampoco es ideal, y aparece una interferencia entre canales que debe eliminarse, en la medida de lo posible, el receptor MIMO correspondiente. En la literatura se pueden encontrar descripciones con distintas estrategias de optimización, y usando bien receptores de tipo lineal o no lineal.

¹⁴ 3GPP TS 36.211 V8.1.0. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (EUTRA); Physical Channels and Modulation*. 2007. Consulta: diciembre 2017.

Figura 16. **Precodificación**



Fuente: 3GPP TS 36.211 V8.1.0. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (EUTRA); Physical Channels and Modulation*. 2007. Consulta: diciembre 2017.

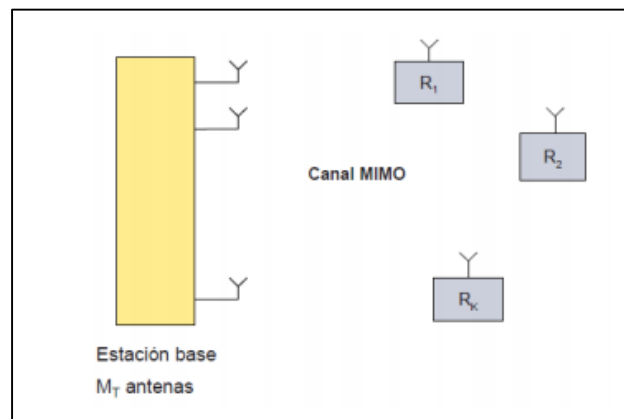
4.1.5. Mimo multiusuario (MU MIMO)

Una extensión en la explotación del multiplexado espacial surge con el MU MIMO (Multi User MIMO). A diferencia de las estructuras MIMO, SUMIMO (Single User MIMO), compete solamente a la mejora de las prestaciones del enlace entre la estación de base y un móvil, habilitando para ello varios caminos paralelos desacoplados entre ambos. Con el MU MIMO lo que se pretende es que hasta K móviles distintos puedan compartirla misma banda de frecuencias. Se pretende con ello explotar una posible ortogonalidad o desacoplo espacial entre los flujos de datos que se transportan entre la base y cada uno de los distintos K móviles. ¹⁵

¹⁵ GESBERT, D.; et al. *Shifting de MIMO (2007) .Paradigm: from single user to multiuser Communications*. p 78.

En la medida que ello sea factible, lo que se consigue es ya no una mejora de velocidad de transmisión por unidad de banda en el enlace base-móvil, sino una mejor eficiencia en la suma de las velocidades de transmisión por unidad de banda en el conjunto de la celda. Es decir, con SU MIMO se pretende aumentar la capacidad del enlace mientras que con MU MIMO se pretende aumentar la capacidad de la celda. Cabe destacar que la primera *release* de LTE contempla estructuras MU MIMO, si bien con solo una antena operativa en el receptor móvil

Figura 17. **Esquema MIMO multiusuario**



Fuente: GESBERT, D.; et al. *Shifting de MIMO (2007) .Paradigm: from single user to multiuser Communications*. p 78.

4.1.6. Comparación entre estructuras MIMO y MU MIMO

Las estructuras MU MIMO presentan inconvenientes con respecto a las convencionales:¹⁶

¹⁶ GESBERT, D.; et al. *Shifting de MIMO (2007) .Paradigm: from single user to multiuser Communications*. p 78.

- Efecto cerca-lejos (Far-end), ya que puede haber significativas diferencias en las pérdidas de propagación entre cada usuario y la base, que no siempre pueden ser compensadas debido a la máxima potencia transmitida por un móvil, así como a los propios errores del control de potencia, lo que entre otras consecuencias puede redundar en la falta de equidad en el trato a todos los móviles por la base.
- El problema asociado a la propia gestión de la estructura MIMO hay que combinarlo con un *scheduler* adecuado, en relación a los usuarios que comparten un acceso a través de una firma espacial asignada a cada uno para poder habilitar un multiplexado espacial.
- La cooperación entre usuarios con distintas antenas es mucho más difícil que la cooperación entre las varias antenas que forman parte de una misma estructura.

4.2. Estructuras de transmisión y recepción OFDMA con múltiples antenas

Para el *downlink*, OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) es la técnica elegida. En OFDMA las subportadoras pueden ser compartidas entre múltiples usuarios. La solución OFDMA lleva a una relación de potencia de valor pico a promedio PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) alta. Esto requiere amplificadores de potencia de alto costo con altos requerimientos de linealidad, ya que incrementa el consumo de potencia para el emisor, por lo que no es un problema para el eNB pero sería muy costoso para un UE.

5. INTERFAZ RADIO DEL SISTEMA LTE

5.1. División funcional y pila de protocolos

La arquitectura TCP/IP consta de cuatro niveles. Un primer nivel de acceso a la red, que englobaría el nivel físico, el de enlace de datos y parte del nivel de red del modelo de referencia OSI de la ISO.

5.2. Radio Resource Control (RRC)

Esta capa permite establecer una conexión de control entre el eNB y un equipo de usuario a través de la cual se llevan a cabo un número importante de funciones relacionadas con la gestión de la operativa de la interfaz radio. Entre dichas funciones de la capa RRC destacan los mecanismos de gestión de los servicios portadores radio (ejemplo, señalización para el establecimiento/liberación/modificación de los portadores radio), el soporte de funciones de movilidad (ejemplo, señalización de *handover*), la difusión (*broadcast*) de parámetros de sistema y funciones de aviso de los terminales que no disponen de una conexión RRC establecida (ejemplo, envío de avisos a través del canal de *paging*). El servicio de transferencia que ofrece la capa PDCP para el envío de los mensajes de señalización del protocolo RRC se denomina servicio portador de señalización (Signalling Radio Bearer, SRB).

5.3. Packet Dependence Convergence Protocol (PDCP)

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, mismos que indican la secuencia de los paquetes.

5.4. Capa RLC-MAC

La capa RLC permite enviar de forma fiable los paquetes PDCP entre el eNB y el equipo de usuario. Para ello, la capa RLC soporta funciones de corrección de errores mediante mecanismos Automatic Repeat ReQuest (ARQ), concatenación, segmentación y reensamblado, entrega ordenada de paquetes PDCP a capas superiores (excepto durante el mecanismo de *handover*), detección de duplicados y detección/recuperación de errores en el protocolo. Cada servicio portador radio tiene una entidad RLC asociada.

5.4.1. Funcionalidades relevantes de la subcapa RLC

La capa RLC permite enviar de forma fiable los paquetes PDCP entre el eNB y el equipo de usuario. Para ello, la capa RLC soporta funciones de corrección de errores mediante mecanismos Automatic Repeat ReQuest (ARQ), concatenación, segmentación y reensamblado, entrega ordenada de paquetes PDCP a capas superiores (excepto durante el mecanismo de *handover*), detección de duplicados y detección/recuperación de errores en el protocolo. Cada servicio portador radio tiene una entidad RLC asociada.

5.4.2. Funcionalidades relevantes de la subcapa MAC

Es la capa encargada de controlar el acceso al canal radio (figura 2). Para ello, la capa MAC soporta funciones de *scheduling* dinámico entre equipos de usuario atendiendo a prioridades, multiplexa los paquetes RLC de diferentes servicios portadores radio en los canales de transporte ofrecidos por la capa física (un canal de transporte puede ser compartido por varios servicios portadores de uno o varios equipos de usuario) y realiza un control de errores mediante Hybrid ARQ (HARQ). Los servicios de transferencia que la capa MAC ofrece a la capa RLC se denominan canales lógicos. Existe una única entidad MAC por celda.

5.5. Capa física

Es la capa encargada de realizar la transmisión propiamente dicha a través del canal radio. Alberga funciones de codificación de canal, modulación, procesado asociado a las técnicas de múltiples antenas de transmisión/recepción, y mapeo de la señal a los apropiados recursos físicos frecuencia-tiempo. En el enlace ascendente, la capa física se basa en un esquema *single-carrier* FDMA. En el enlace descendente, el esquema de transmisión es OFDMA. Los servicios de transferencia que la capa física ofrece a la capa MAC se denominan canales de transporte. Existe una única entidad de capa física por celda

5.5.1. Concepto de bloque de recursos físicos (*physical resource block*)

La estructura de bloques en LTE la forman los *physical resource block* (PRB) y el manejo de todos los PBRs lo hace una función de *scheduling* en el eNodeB.

5.5.2. Estructura de trama

En el dominio del tiempo los recursos físicos del sistema LTE se estructuran siguiendo dos tipos de estructuras de trama: de tipo 1 y de tipo 2.

La estructura de trama de tipo 1 se utiliza tanto para el enlace descendente como para el ascendente y soporta semi y *full-dúplex* FDD. La trama de tipo 1 se divide en tramas de 10 ms y cada trama está a su vez compuesta por 20 ranuras temporales (*slot*) de duración 0,5 ms. Se define una unidad básica de recursos, formada por dos ranuras temporales que se denomina subtrama de duración 1 ms. En cada ranura temporal se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDM, cada uno de ellos de duración $T_s = 66,7 \text{ us}$. Si se usan 7 símbolos, el prefijo cíclico corto tiene una duración de 4,7 us, salvo para el primer símbolo, que tiene un prefijo cíclico de 5,2 us. En el caso de utilizar 6 símbolos por ranura temporal, entonces el prefijo cíclico largo tiene una duración de 16,67 us. En el caso de que la celda sea muy grande se utilizan 6 símbolos, ya que el retardo de propagación suele ser del orden de us y se requiere un prefijo cíclico mayor para compensar la propagación multitrayecto.

5.5.3. Enlace descendente

Se utilizan para obtener medidas de calidad en el enlace descendente, estimar la respuesta del canal para demodulación/detección coherente e implementar mecanismos de búsqueda de celda y sincronización inicial.

5.5.4. Enlace ascendente

En el caso del enlace descendente se distingue entre canales físicos de tráfico compartidos y canales físicos de control, utilizados para transportar tanto señales de control generadas en la capa física del sistema como los mensajes de control generados en las capas superiores de este.

- Physical Uplink Shared Channel (PUSCH): es el canal utilizado para enviar la información de usuario. Se transmite utilizando señales SC-FDMA durante una o varias subtramas. El número de subportadoras utilizado lo determina el gestor de recursos radio (*scheduler*) del enlace ascendente. Esta asignación la hace el eNodeB y se transmite al terminal móvil mediante el canal PDCC
- Physical Uplink Control Channel (PUCCH): contiene información de control del enlace ascendente. En particular puede transmitir las siguientes informaciones de control:
 - Peticiones de asignación de recursos (scheduling request).
 - Reconocimientos (ACK/NACK) para el mecanismo de retransmisión híbrido (HARQ) de paquetes en el enlace descendente.

- Información de la calidad del canal (*channel quality indicator-CQI*) necesaria para optimizar los procedimientos de asignación de recursos radio en el enlace descendente.

5.6. Mapeo entre canales físicos, de transporte y lógicos

Un canal lógico se puede usar para enviar información de control de las capas superiores (*signalling radio bearer, SRB*) o de tráfico (*radio bearer, RB*).

- Canales lógicos: definen el tipo de información enviada: de control / de tráfico.
- Canales de transporte: definen el formato de envío: comunes / dedicados.
- Canales físicos: definen los recursos físicos utilizados: frecuencia, secuencias, código. Además pueden distinguirse por división temporal (en DL) o por fase I/Q (en UL).

5.7. Categorías de terminales móviles en LTE

Las velocidades de transmisión que se pueden alcanzar en LTE dependen principalmente del ancho de banda, el esquema de modulación, la compatibilidad con MIMO y de características adicionales tales como la agregación de portadoras. En las versiones 8 a 12 de 3GPP se especifican categorías para definir las funcionalidades que admite una estación móvil. Es útil informarse sobre la evolución de categorías de equipos de usuario LTE y de cómo verificar el rendimiento de los dispositivos basándose en su correspondiente categoría con el probador de radiocomunicaciones de banda ancha.

5.8. Procedimientos básicos asociados a la interfaz aire

Se describen los procedimientos básicos para la interfaz aire.

5.8.1. Procedimiento de sincronización y adquisición inicial de parámetros

La primera acción que un terminal móvil LTE debe realizar después de activarse es buscar una celda a la que conectarse. Con este procedimiento se pretende:

- Sincronizarse en tiempo y frecuencia a nivel de capa física el terminal móvil con el transceptor ubicado en el eNB de la celda a la que el terminal móvil desea conectarse.
- Adquirir la sincronización temporal a nivel de trama y subtrama.
- Determinar la identidad física de la celda. El procedimiento de búsqueda de celda se basa en el uso de las señales de sincronización primaria y secundaria del sistema.

A partir de la señal primaria de sincronización (P-SCH), que se transmite utilizando las 62 subportadoras centrales, y utilizando un proceso de correlación, se detecta la posición temporal de la misma. En el caso de operar en modo FDD esta señal de sincronización primaria siempre aparece en el último símbolo OFDMA de la primera y undécima ranura temporal (TS) de cada trama, permitiendo de esta forma que el terminal móvil conozca los límites temporales a nivel de ranura temporal (i.e., slot). De modo análogo, en el caso de operar en modo TDD, las señales de sincronización primarias aparecen en el tercer símbolo de las ranuras temporales tercera y décimotercera y, por lo tanto,

de forma análoga, la detección de estas dos señales también permite al terminal móvil fijar los límites de cada ranura temporal.

Figura 18. **Procedimiento de sincronización**



Fuente elaboración propia.

5.8.2. **Procedimiento de acceso aleatorio**

Se entiende por acceso aleatorio al procedimiento mediante el cual un terminal móvil se conecta a un determinado eNB. Este procedimiento se ejecuta por diversas razones:

- Al acceder el terminal móvil a la red.
- Cuando el terminal móvil realiza un procedimiento de *handover*, es decir cuando a lo largo de una llamada cambia de eNB.
- Cuando el terminal móvil realiza procedimientos de reelección de celda.
- Como resultado de una llamada entrante, etc.

5.8.3. **Mecanismo de aviso (PAGING)**

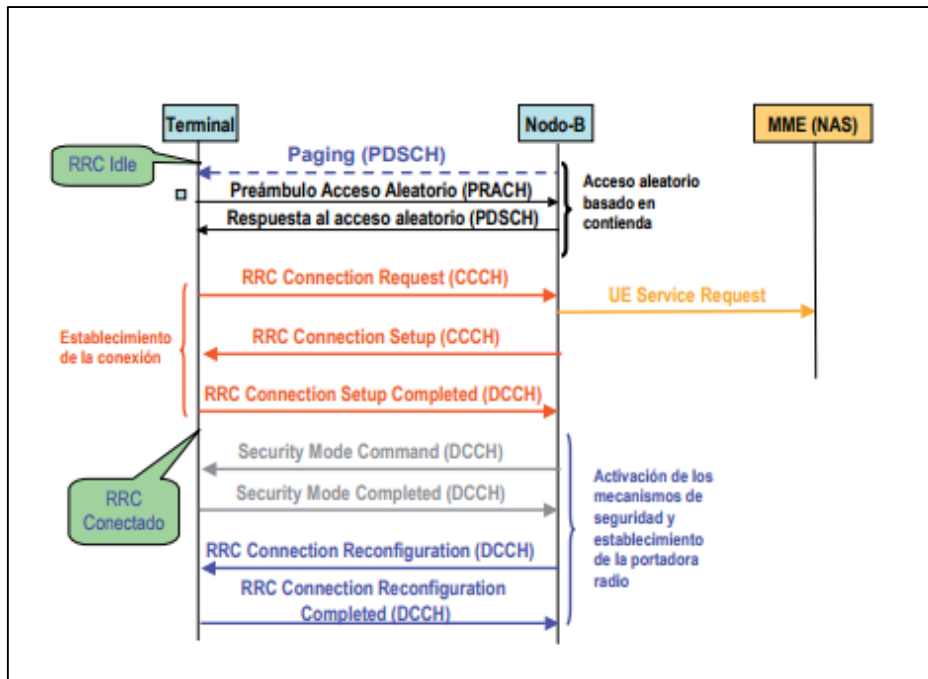
Los principales propósitos de este procedimiento son:

- Llamar o despertar a los terminales móviles que se encuentran en estado de espera (*idle*) a nivel de capa RRC.
- Informar a terminales móviles activos (RRC *connected*) de cambios en el sistema de información o de notificaciones de emergencia (ETWS) localizadas en los bloques de información de señalización SIB10 o SIB11.

5.8.4. Mecanismo de establecimiento del servicio portador radio

Para poder establecer cualquier tipo de transferencia de información entre el terminal móvil y el eNB es necesario establecer el denominado servicio portador radio. El mecanismo de establecimiento de la conexión a nivel de capa RRC implica el establecimiento de un servicio portador de señalización del tipo SRB1 (dedicado al intercambio de mensajes del protocolo RRC y los protocolos NAS) y el envío de un mensaje hacia el NAS pidiendo el establecimiento de una conexión a través de la interfaz S1 que conecta al eNB con el gestor de movilidad (MME). Habitualmente, después de esta primera fase de establecimiento de la conexión se inicia una segunda fase en que se activan los mecanismos de seguridad y se establece un segundo servicio portador radio de señalización (SRB2) y uno o varios servicios portadores de datos (DRB), dependiendo del número de portadores opcionales y por defecto establecidos con la red troncal EPC (Evolved Packet Core) del sistema LTE.

Figura 19. **Secuencia de mensajes en el procedimiento de establecimiento de la conexión**



Fuente elaboración propia.

5.8.5. Mecanismo de información del estado del canal (CQI-REPORTING)

El terminal móvil proporciona a la red tres tipos de información del canal:

- CQI- Indicador del estado del canal
- RI – Indicador del rango
- PMI- Identificador de la matriz de precodificación

De estos tres indicadores, el más importante es el CQI que permite describir hasta 16 posibles esquemas de modulación-codificación (MCS). Por

consiguiente, este indicador informa al eNB sobre los posibles parámetros a utilizar en el proceso de adaptación de enlace. De hecho, con este indicador se informa al eNB de cuál es el índice máximo de la configuración MCS que permite garantizar una tasa de error (BLER) en el bloque de transporte recibido inferior a 10^{-1} (10 %). En otras palabras, el eNB podrá utilizar cualquier esquema de modulación-codificación cuyo índice sea inferior o igual al indicado en el CQI, ya que está garantizado que la BLER soportada por el bloque de transporte siempre será inferior al 10 %. Con el objetivo de reducir el peso de la señalización, los informes sobre CQI se realizan en términos de sub-bandas, cuyo tamaño varía en función del modo de operación utilizado (periódico o aperiódico) y del número de recursos físicos (PRB) ubicados en la banda disponible. Esto es necesario para poder efectuar una gestión de recursos que tome en consideración la naturaleza selectiva en frecuencia del canal radio (*frequency selective packet scheduling*).

Cuando el terminal móvil opera en modo MIMO, el indicador de rango (RI) se utiliza para indicar cuál es el número apropiado de capas a considerar en el esquema de multiplexado espacial. Este indicador siempre se transmite asociado a uno o varios informes CQI, si bien como los valores de RI varían más lentamente que los valores de CQI, este indicador es transmitido con menor periodicidad. El indicador RI toma valores 1 ó 2 en el caso de considerar estructuras de multiplexación espacial del tipo 2x2, mientras que puede llegar hasta 4 cuando la estructura de multiplexación es del tipo 4x4. En el caso de utilizar diversidad en transmisión en el eNB este indicador no aplica.

El indicador PMI informa al eNB de cuál es la matriz de precodificación 46 preferida, a tenor del estado del canal. El número de matrices de precodificación depende del número de antenas considerado en el eNB, del valor de RI y de las capacidades del terminal móvil. Así, para el caso de un eNB

con dos antenas se puede elegir entre un total de 6 matrices posibles, mientras que en el caso de 4 antenas, el número de posibles matrices se eleva a 64. Como en el caso del RI este indicador se transmite en caso de utilizar estructuras MIMO actuando como sistemas de multiplexación espacial.

CONCLUSIONES

1. LTE es una tecnología inalámbrica basada en IP, con una infraestructura diseñada para ser tan simple como sea posible de implementar y operar, ofreciendo un alto rendimiento y baja latencia en un entorno móvil, con velocidades de hasta 300Mbps en *downlink* y de 75Mbps en *uplink*, con un ancho de banda de 20MHz. La eficiencia espectral de LTE ha tenido una gran mejora, llegando a cuatro veces HSPA en *downlink* y tres veces en *uplink*.
2. Previo al diseño se realizó el levantamiento de información acerca de las estaciones base existentes bajo tecnología 3G UMTS/HSPA+, con el fin de conocer detalladamente sus características y modo de operación, lo cual servirá de base para el nuevo diseño de la red LTE.
3. Según el estudio teórico realizado previo al desarrollo del diseño, se pudo analizar que la tecnología LTE nace a partir de una gran evolución que han tenido los estándares de tecnología móvil de la 3GPP, cada eslabón ha hecho posible que se adquirieran nuevas técnicas, principios de funcionamiento y arquitectura de red, lo cual hoy se ve reflejado en las características únicas y de máxima velocidad propias de LTE.

RECOMENDACIONES

1. Para la implementación de una red LTE se puede tomar como base una red GSM, HSPA o HSPA+. La mejor de las 3 opciones es tomar como base una red HSPA+, ya que la técnica de acceso a radio, aunque no es igual en su totalidad, sí tiene los mismos fundamentos básicos.
2. Si la migración a la tecnología LTE se hace desde una red GSM se debe tomar en cuenta que, a nivel del núcleo de red, se debe incorporar totalmente el bloque ECP; adicionalmente se deben hacer cambios en todo el bloque de acceso a radio.
3. Si la migración a la tecnología LTE se hace desde una red HSPA, se debe tomar en cuenta que el bloque CP debe ser eliminado en su totalidad y luego incorporar un nuevo bloque ECP. También la técnica de acceso de radio debe cambiar a EUTRAN.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARRESE, Baltazar. *Diseño de una red LTE*. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 2009. 178 p.
2. División de Servicios Internacionales, 3GPP. [En línea.] *Centro de gestión de la red*. <<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>> [Consulta: diciembre 2017].
3. GESBERT, D.; et al. *Shifting de MIMO*. Paradigm: From Single User to Multiuser Communications, IEEE Signal Processing Magazine, vol. 24, no. 5, 2007. 98 p.
4. GUEVARA TOLEDO, A. *Estado actual de las redes LTE en Latinoamérica*. Escuela de Electrónica y Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, Cuenca. Ecuador. 2013. 202 p.
5. IETF RFC 4303. *IP Encapsulating Security Payload (ESP)*. [Consulta: diciembre 2017].
6. LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access. [Consulta: diciembre 2017].
7. MISHRA, Ajay R. *Fundamentals of cellular network planning and optimisation*. England: John Wiley & Sons, 2004. 267 p.

8. MYUNG, H.G.; LIM, J.; GOODMAN, D. J. *Single carrier FDMA for uplink wireless transmission*. IEEE Vehicular Technology Magazine. 75 p.
9. NÚÑEZ, Coral. *Diseño de una red de nueva generación LTE-A para una zona urbana en Bogotá bajo el estándar 3gpp y la recomendación ITU-R M.1457*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Sistemas e Industrial. 178 p.
10. OCHOA, M. *Manual para establecer la certificación del servicio de roaming internacional de voz sobre una red GSM*. Facultad de Ingeniería, División de Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional Autónoma de México, 2012. 168 p.
11. Revista Telem@tica. Vol. 12. No. 3, septiembre-diciembre, 2013. ISSN 1729-3804. 88 p.
12. 3GPP TS 36.211 V8.1.0. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (EUTRA); Physical Channels and Modulation*. [Consulta: diciembre 2017].
13. 3GPP TS 33.210. *3G Security; Network Domain Security; IP network layer security*.

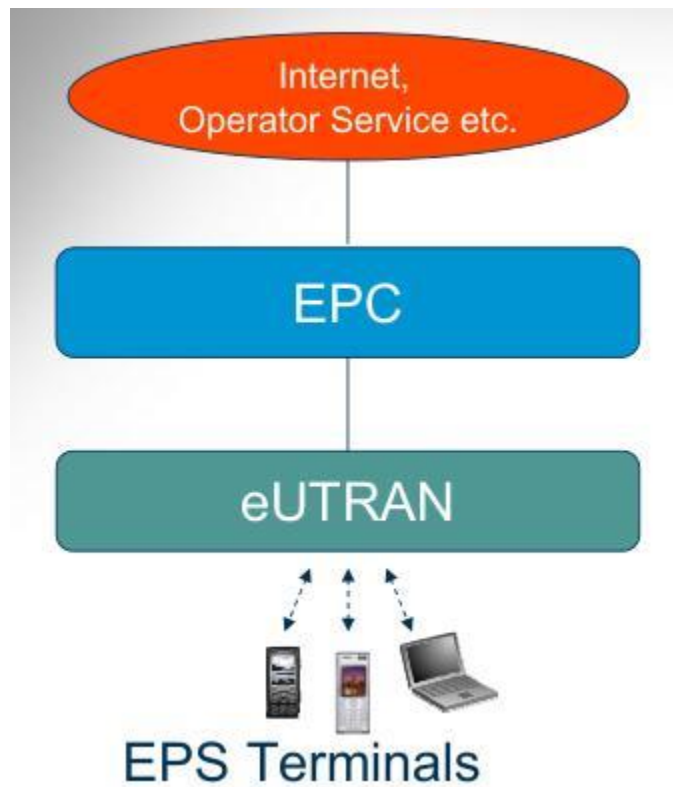
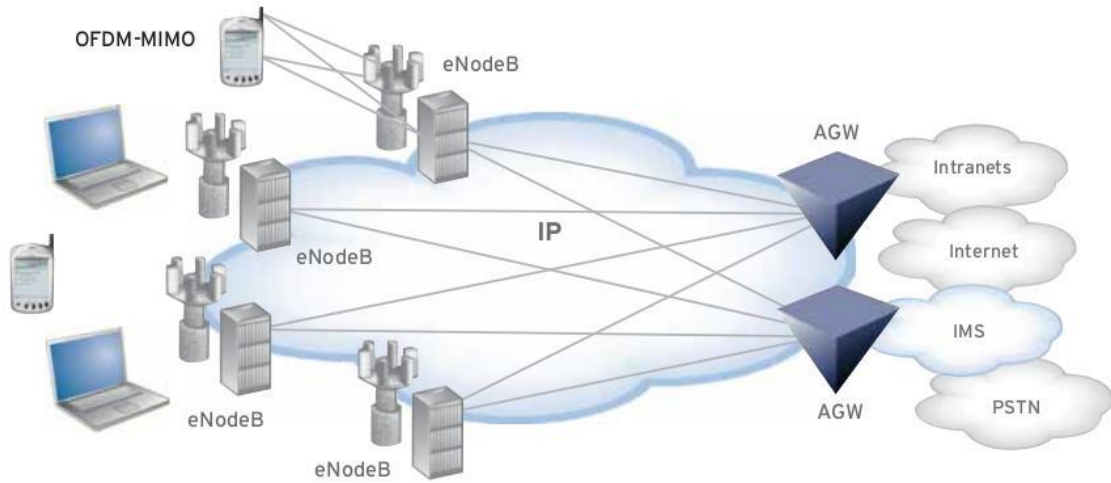
APÉNDICE

Apéndice 1. **Arquitectura LTE**

La arquitectura LTE consta de dos partes: la EPC y la EUTRAN (Envolved UTRAN). La EUTRAN es la parte de la red que se encarga de todas la funciones relacionadas a la interfaz de radio y el control de los móviles, por otro lado, la EPC brinda acceso a otras redes de paquetes IP, además, es aquí donde se gestiona los aspectos relacionados a la seguridad, calidad de servicio, gestión de recursos y movilidad.

Continuación Apéndice 1.

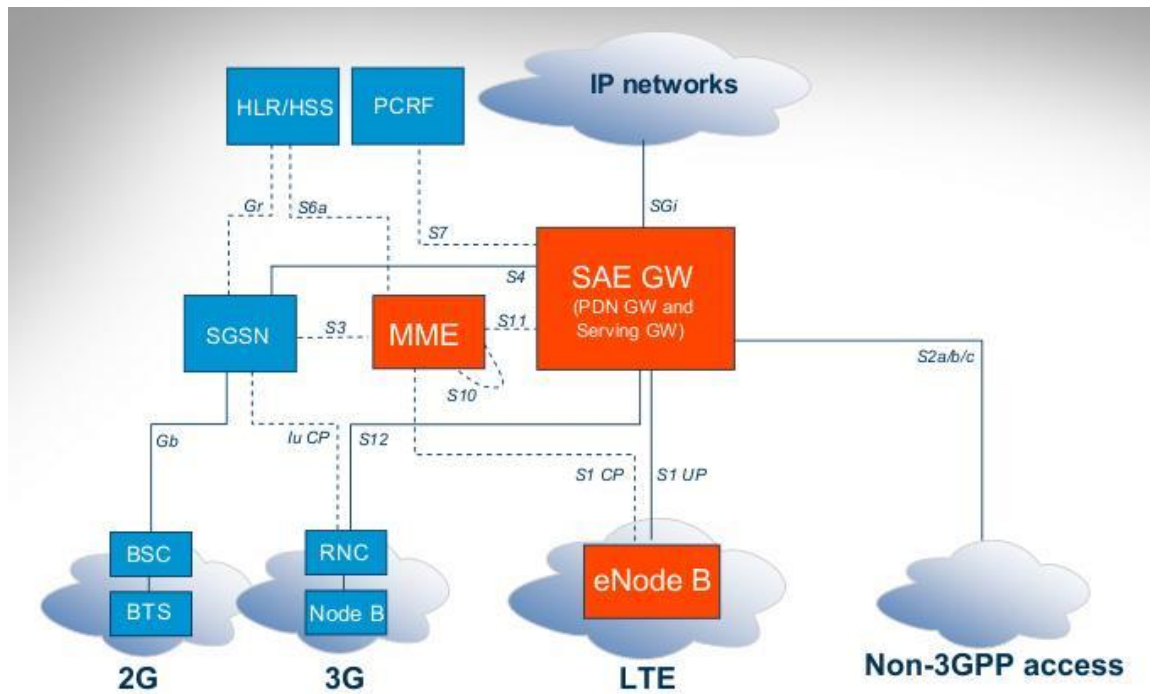
Arquitectura LTE



Fuente: elaboración propia.

Continuación Apéndice 1.

Arquitectura LTE interconectada con otras redes



Fuente: elaboración propia.

