

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



DISEÑO DE UNA RED LTE EN LA CIUDAD DE TRUJILLO

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE TELECOMUNICACIONES

PRESENTADO POR:

ANDRÉS BILLY BALTAZAR ARRESE

PROMOCIÓN

2009 – I

LIMA – PERÚ

2013

DISEÑO DE UNA RED LTE EN LA CIUDAD DE TRUJILLO

DEDICATORIA

A lo seres que siempre confiaron en mí de manera incondicional, mis padres: Guillermo y María.
En memoria al Ing. Percy Fernández, mi asesor inicial, y al Ing. Luis Montes por su apoyo en la elaboración de esta tesis.

SUMARIO

El crecimiento de las redes de telecomunicaciones a nivel mundial ha demandado que se desarrollen nuevas tecnología que puedan atender las necesidades de los usuarios. Nuestro país no es ajeno a estos cambios que se vienen desarrollando.

La presente tesis esta orienta al diseño de una red de cuarta generación en la ciudad de Trujillo mediante el uso de la tecnología LTE propuesta por el 3GPP. En el Perú, Trujillo es una de las ciudades más importantes desde el punto de vista de los operadores de telefonía celular y es por ello que está considerado dentro de los tres puntos más estratégicos de la red de Movistar, Claro y Nextel (actuales operadores en nuestro país)

En el desarrollo de la tesis se presentarán aspectos sociales y económicos de la ciudad de Trujillo, características y ventajas de la tecnología planteada, diseño de la red a implementar y un análisis económico para ver la factibilidad del proyecto. Estos temas serán desarrollados de manera detalla en cada uno de los cinco capítulos de esta tesis.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA CELULAR.....	3
1.1 IMT 2000.....	3
1.2 REDES 3G.....	4
1.3 REDES 4G.....	8
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 ARQUITECTURA DE REDES CELULARES.....	10
2.2 ARQUITECTURA DE UNA RED LTE.....	12
2.3 PROTOCOLOS DE LA INTERFAZ DE AIRE.....	39
2.4 CAPA FÍSICA.....	57
2.5 GRADO DE SERVICIO.....	66
CAPÍTULO III	
ESTIMACIÓN DEL MERCADO POTENCIAL EN LA CIUDAD DE TRUJILLO..	68
3.1 INFORMACIÓN GENERAL.....	68
3.2 SITUACIÓN ACTUAL DE LAS TELECOMUNICACIONES.....	76
3.3 DETERMINACIÓN DEL MERCADO Y SERVICIOS.....	84
CAPÍTULO IV	
DISEÑO DE RED.....	88
4.1 ELECCIÓN DE BANDA DE FRECUENCIA Y MODELO DE PROPAGACIÓN....	88
4.2 CÁLCULOS DE COBERTURA.....	92
4.3 CAPACIDAD DEL DL Y UL.....	105
4.4 CAPACIDAD REQUERIDA POR LOS USUARIOS.....	111
4.5 CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE ESTACIONES BASE.....	109
4.6 RED DE ACCESO.....	117
4.7 RED DE TRANSPORTE.....	122
4.8 INTERCONEXIÓN CON REDES EXISTENTES.....	129
4.9 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL EQUIPAMIENTO.....	138
4.10 TIEMPO DE IMPLEMENTACIÓN.....	141

CAPÍTULO V	
ASPECTOS ECONÓMICOS.....	142
5.1 COSTOS DE INVERSIÓN E INSTALACIÓN (CAPEX).....	142
5.2 COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (OPEX).....	143
5.3 ESTUDIO ECONÓMICO.....	144
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	149
ANEXO A	
PROYECCIÓN DE LA PEA AL 2015.....	151
ANEXO B	
LISTA DE ABREVIATURAS.....	153
BIBLIOGRAFÍA.....	158

INTRODUCCIÓN

Desde su aparición las comunicaciones móviles se encuentran en un considerable crecimiento, en una primera fase con la tecnología GSM y luego con la aparición de la tecnología UMTS, que nos está demandando día a día mayores beneficios no solo en servicios sino en tecnología. Esto nos indica que estamos en los albores de una nueva generación de comunicaciones móviles, la cuarta generación o 4G, donde el sistema LTE es la primera especificación concluida por 3GPP.

Entre los servicios relevantes de esta tecnología tenemos que todos los servicios, incluida la voz, se soportan sobre el protocolo IP y se puede contar con velocidades dentro del rango de 100 Mbps y 1 Gbps, las cuales son ampliamente superiores a las velocidades ofrecidas por los sistemas predecesores.

En esta tesis se plantea brindar las bases de los principios en lo que sustenta el sistema LTE para luego llevar a cabo la planificación de una red en una ciudad representativa de nuestro país, Trujillo. Con esta finalidad se ha estructurado el trabajo en cinco capítulos que se introducen a continuación.

En el Capítulo 1: “Evolución de la tecnología celular”, se despliega, a manera de capítulo introductorio, el contexto dentro del que el sistema LTE debe inmiscuirse. Mención a la evolución de los sistemas que se han ido desarrollando en cada una de las generaciones predecesoras. Se pretende mostrar como el sistema LTE se adapta al ecosistema tecnológico que se ha ido desarrollando.

En el Capítulo 2: “Marco Teórico”, se proporciona una visión global de la estructura de un sistema LTE realizando una previa descripción genérica de las arquitecturas de los sistemas celulares desarrollados por 3GPP. En ella se mencionan los elementos que constituyen tanto la red de acceso como el núcleo de la red, haciéndose hincapié en cada uno de los nodos, las interfaces y los protocolos que se establecen entre los elementos de la red. Así mismo, se menciona el Grado de Servicio que ofrece el sistema.

En el Capítulo 3: “Estimación del mercado potencial en la ciudad de Trujillo”, una vez conocido las principales características que puede ofrecer el sistema, se procede al estudio de un escenario para llevar a cabo el diseño, y posterior implementación, de un sistema

LTE en el entorno nacional. Trujillo es la ciudad elegida para este fin, su elección se basa en un estudio social, poblacional, económico y tecnológico (desde el punto de vista de las telecomunicaciones). Además, se indica cuáles serán las características y precios de los servicios que se ofrecerán según el perfil de los usuarios.

En el Capítulo 4: “Diseño de Red”, se plantea la ingeniería necesaria para el diseño de una red LTE en la ciudad de Trujillo. El análisis parte de la selección de las frecuencias a usar según normativa internacional y nacional, los cálculos de propagación usando el modelo Cost 231- Hata, diseño de la red de acceso, diseño de la red de transporte y la solución para la interconexión con redes existentes. Una vez definida nuestra planificación se dan las especificaciones técnicas de la propuesta de equipos a usar en la implementación y el cronograma de trabajo.

En el Capítulo 5: “Análisis Económico”, a modo de brindar una planificación completa del proyecto, se realiza un estudio de la factibilidad económica de nuestro proyecto que permitirá decidir qué tan recomendable es llevar a cabo la implementación de la red. Este análisis parte del conocimiento del OPEX y CAPEX para luego realizar una evaluación mediante los indicadores: VAN, TIR, periodo de recupero, entre otros.

CAPÍTULO I EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA CELULAR

En los últimos años, el crecimiento del mercado de las comunicaciones móviles ha sido de manera exponencial. Las tendencias que están marcando el rumbo de las comunicaciones en la actualidad son dos: el espectacular incremento del uso del internet y la proliferación de redes de datos inalámbricas. En línea con estas tendencias estamos presenciando el nacimiento de una nueva gama de servicios móviles tales como video streaming, navegación de web, juegos en red, redes sociales, mundos virtuales, etc. Estos servicios que hasta la fecha solo se soportaban en las redes fijas, traen consigo un incremento exponencial del tráfico de datos y demandan unos requisitos de capacidad superiores a los que nos proporcionan las redes móviles actuales.

A la vista de tal panorama, los operadores de red tienen la necesidad de implementar nuevas tecnologías para poder hacer frente a semejante aumento del tráfico. A continuación se dará una vista panorámica de la evolución de las redes celulares.

1.1 IMT 2000

Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000 (IMT -2000 por sus siglas en inglés) es el estándar global para la tercera generación de redes de comunicaciones inalámbricas 3G, definidas por un sistema de estándares de la Unión Internacional de Telecomunicaciones. IMT-2000 proporciona un marco para el acceso inalámbrico mundial uniendo los diversos sistemas de redes terrestres y satelitales [1].

La visión del IMT-2000 es que los abonados a comunicaciones móviles tendrán acceso a voz, datos y servicios multimedia en cualquier parte y en cualquier momento. Esto se desea hacer conectando todas las diferentes tecnologías inalámbricas (WLAN, celulares, comunicaciones satelitales y otros sistemas de acceso) a un núcleo flexible de red/tecnología basado en paquetes. De esta forma, un usuario individual puede conectarse a cualquiera de los diferentes sistemas que desee.

La principal recomendación de IMT-2000 es la UIT-R M.1457-10 [1], la cual brinda una familia de interfaces de radio. Esta familia está compuesta por 5 interfaces de radio terrestre:

- _ IMT-2000 CDMA Direct Spread, esto corresponde a UMTS en modo FDD.
- _ IMT-2000 CDMA Multi-Carrier, esto corresponde a la familia cdma2000.
- _ IMT-2000 CDMA TDD, corresponde a UMTS en modo TDD.
- _ IMT-2000 TDMA Single-Carrier, tecnología de acceso basada en la evolución de la interfaces 2G GSM/EDGE.
- _ IMT-2000 FDMA/TDMA, corresponde a una alta tasa de bit y paquetes de datos de la evolución del estándar 2G DECT (Digital European Cordless Telephone)
- _ IMT-2000 OFDMA TDD WMAN

La Figura 1.1 muestra la familia de interfaces IMT-2000.



Figura 1.1 Interfaces de radio definidas por IMT-200

1.2 REDES 3G

La tercera generación surge como la necesidad de contar con una red que sea capaz de soportar y ofrecer servicios de acceso a Internet con altas velocidades en transferencia de datos, video conferencias y otros servicios multimedia.

Las tecnologías móviles 3G dominantes son cdma200 y UMTS, basadas en las redes de acceso radio (RAN) en CDMA2000 y GERAN (GSM/EDGE Radio Access Network) y UTRAN (UMTS Radio Access Network) en UMTS.

1.2.1 UMTS

UMTS es la evolución de la red de segunda generación GSM, tal como se muestra en la Figura 1.2.

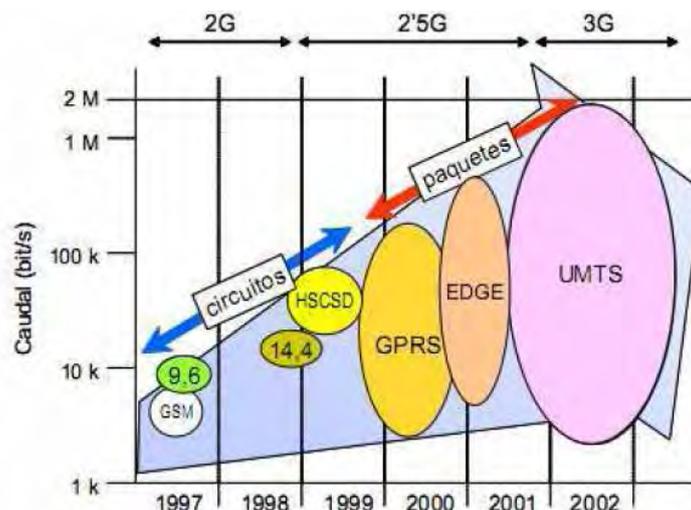


Figura 1.2 Evolución de los sistemas celulares de origen GSM [2]

Entre los servicios que permite acceder UMTS están las videoconferencias, streaming multimedia, acceso a canales de televisión en tiempo real, transferencia de archivos de considerables tamaños, juegos en tiempo real y soporte a Redes Privadas Virtuales (VPNs).

A. ARQUITECTURA

En la Figura 1.3 se muestra la arquitectura básica de la red UTRAN, cuya estructura está formada por 3 partes básicas.

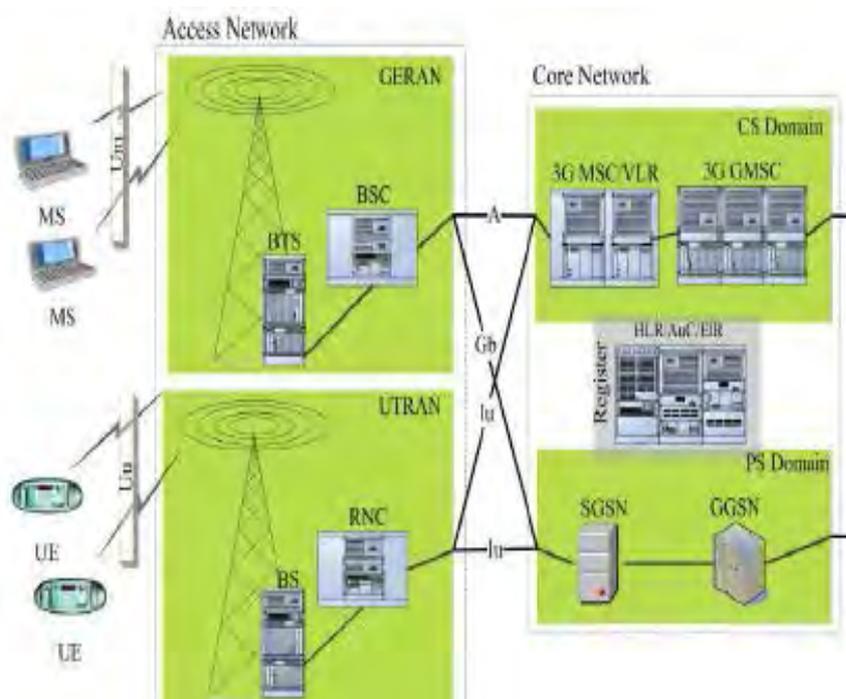


Figura 1.3 Arquitectura de un red UTRAN [3]

_ **UE (User Equipment):** contiene el equipo móvil (ME) y la tarjeta USIM (Universal SIM), la cual contiene información del suscriptor que le permite acceder a la red. La UE puede trabajar en tres modos: CS (Circuit Switched), PS (Packet Switched) y CS/PS.

_ **UTRAN (Radio Access Network):** está formada por la estación base o nodo B y el RNC (Radio Network Controller). Las funciones principales de la estación base son el cierre del lazo de control de potencia, codificación de los canales físicos, modulación-demodulación, interfaz de aire para la transmisión/recepción, captura de errores, entre otras. Las tareas de la RNC son la administración y control de los recursos de radio, control de potencia, asignación de canales, cifrado, segmentación/re ensamblado, etc.

_ **CN (Core Network):** su principal función es la conmutación, enrutamiento y tránsito del tráfico de los usuarios. La arquitectura de este dominio de UMTS está basada en la de GSM con GPRS, pero todo el equipamiento debe ser modificado para la operación de UMTS. La CN se puede subdividir en dominios de circuitos (CS) y paquetes (PS). Los elementos del dominio de circuitos son la MSC, VLR y GMSC. Los elementos del dominio de paquetes son el SGSN y el GGSN. Las bases de datos EIR, HLR, VLR y AUC son compartidas por ambos subdominios.

B. TÉCNICAS DE ACCESO DE RADIO

La tecnología UMTS Terrestrial Radio Access (UTRA) escogida por ETSI está basado en tecnología CDMA.

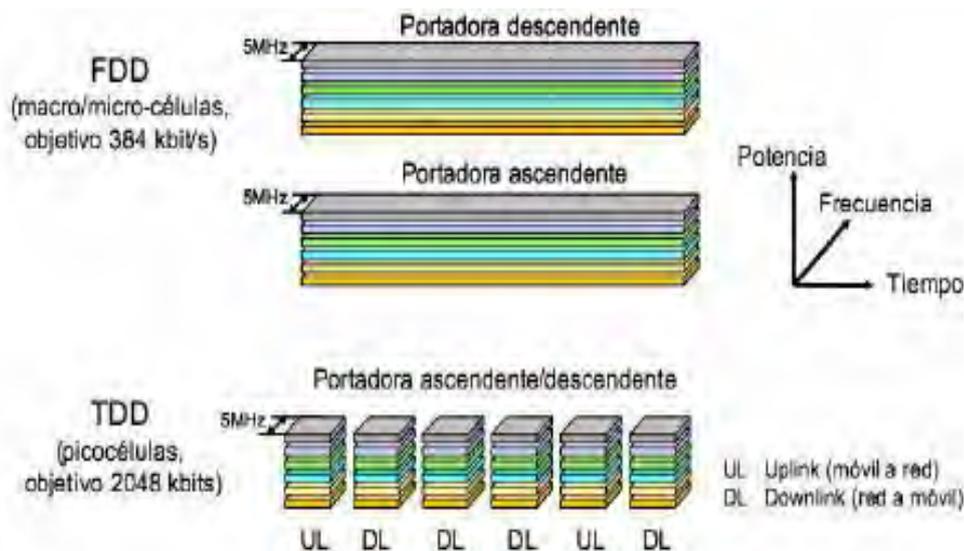


Figura 1.4 Modos de operación de la interfaz de radio UMTS [2]

Para frecuencias apareadas, ETSI seleccionó a DS-SS-SS-SS que es extensamente

conocido como UTRA-FDD o WCDMA. Por otro lado, para las frecuencias desapareadas fue escogido WTDMA/CDMA (UTRA-TDD).

WCDMA

WCDMA es una técnica de multiplexación basada en CDMA (Code Division Multiple Access), que consiste en una asignación de un código digital diferente para cada usuario. Estos códigos son compartidos por el emisor y receptor, la diferencia entre WCDMA y CDMA es que en WCDMA se utilizan códigos con una velocidad mucho mayor que la señal a transmitir.

En el transmisor el código se utiliza para transformar la señal de usuario en una señal de banda ancha (espectro expandido), y en el receptor se utiliza para separar las diferentes comunicaciones que comparten una misma portadora. A los bits que componen el código WCDMA se les llama chips para diferenciarlos de los bits de usuario. Entre las principales características de WCDMA, tenemos:

- _ Operación con un ancho de banda de 5 MHz.
- _ Integración en la capa física de diferentes velocidades de transmisión con una sola portadora.
- _ Factor de reutilización de frecuencias igual a 1.

1.2.2 cdma2000

Las redes cdma2000 son la evolución de las redes de segunda generación IS-95 (también conocido como cdmaOne).

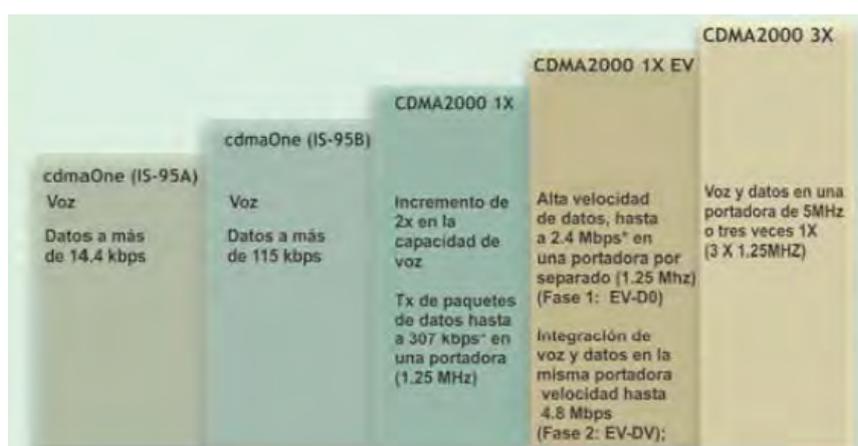


Figura 1.5 Evolución de CDMA a cdma2000 [4]

Con la finalidad de facilitar la evolución de su generación precedente, cdma2000 se divide en dos fases, conocidas generalmente como 1x y 3x. cdma2000 1x a su vez se

divide en dos fases: cdma2000 1xEV-DO (solo considera datos) y cdma2000 1xEV-DV (datos y voz). cdma2000 3x ofrece tres veces las velocidades de cdma2000 1x, con el uso de tres portadoras. La Figura 1.5 muestra las principales características de las fases de CDMA.

1.3 REDES 4G

La demanda de los usuarios por mayores velocidades de acceso ha incrementado considerablemente. Las redes inalámbricas deben ofrecer mayores velocidades de datos con el fin de que los usuarios puedan tener acceso a todas las aplicaciones que actualmente se ofrecen en el mercado de las telecomunicaciones. Las redes inalámbricas deben ser capaces brindar velocidades similares a las que ofrecen las redes fijas.

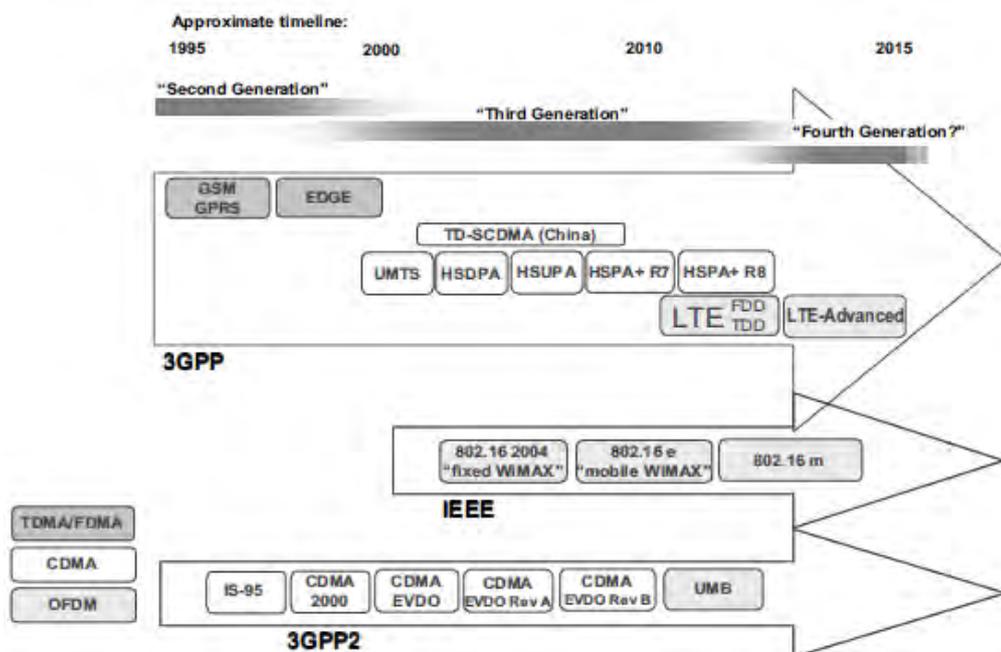


Figura 1.6 Evolución de los estándares según organización [6]

En este sentido diferentes organizaciones han desarrollado estándares que permitan ofrecer al usuario un mayor servicio. En la Figura 1.6 se muestra un resumen de la evolución de los estándares.

En 3GPP el sistema es llamado EUTRA, también es ampliamente conocida como LTE (Long Term Evolution). LTE se basa en la tecnología de acceso OFDMA (para el enlace de bajada) y SC-FDMA (para el enlace de subida).

3GPP2 denominó a su sistema UMB (Ultra Mobile Broadband). El cual es una evolución de la familia cdma2000.

Adicionalmente, el comité de estándares de la IEEE 802 LAN/MAN introdujo el estándar IEEE 802.16, el cual es comúnmente denominado WiMAX.

Los atributos de la interfaz de radio para UMB y WiMAX son muy similares a los de LTE. Los tres sistemas son compatibles con anchos de banda flexibles, multiplexación FDD/TDD, OFDMA en el enlace descendente y esquemas MIMO. Hay algunas diferencias, tales como enlace ascendente de LTE se basa en la SC-FDMA en comparación con OFDMA en Mobile WiMAX y UMB.

El objetivo de todos estos sistemas es ofrecer a los usuarios una experiencia de banda ancha móvil que puede acercarse a la de las actuales redes de acceso fijas, tales como la Línea de Abonado Digital Asimétrica (ADSL).

En la presente tesis se desarrollara un profundo análisis del estándar de 3GPP, es decir Long Term Evolution (LTE).

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 ARQUITECTURA DE REDES CELULARES

A pesar de la constante evolución de las redes celulares, desde una red GSM hasta una red LTE, estas han mantenido una arquitectura de red básica. Esta arquitectura está formada por componentes básicos que tienen asignados, de manera muy diferenciada, funciones distribuidas entre cada uno de las entidades que los componen.

Un componente inicial cumple la función que permite al usuario acceder a los servicios de la red a través de una interfaz de radio. Este acceso se da mediante un componente intermedio que tiene la función de mantener la conexión entre los usuarios y la red mediante la prestación de un servicio portador, es decir, servicios cuya finalidad es la provisión de una cierta capacidad de transmisión. La mayoría de las funciones necesarias para la interfaz de radio son normalmente llamadas funciones de red de acceso. Sin embargo, en una red celular varias funciones adicionales son necesarias para poder proporcionar los servicios de carga necesaria para uso del operador, de autenticación necesaria para certificar que el usuario es un usuario válido, servicio de configuración necesario para asegurar que hay conexión de un extremo a otro, etc. Por lo tanto, existen funciones no relacionadas directamente con la tecnología de acceso radio en sí, pero necesaria para cualquier tecnología de acceso radio. Esas funciones son normalmente llamadas funciones de núcleo de red.

El hecho de que existan diferentes tipos de funciones en un sistema celular, ha llevado a que la arquitectura del sistema se divida en 3 componentes: equipo de usuario (UE), red de acceso radio (RAN) y núcleo de red (CN).

Esta arquitectura genérica ha sido adoptada en las diferentes familias de sistemas celulares 2G y 3G, y también se mantiene en el sistema LTE. La separación entre la red de acceso y el núcleo de la red confiere un importante grado de flexibilidad al sistema de cara a soportar un proceso evolutivo en el que se puedan ir mejorando, agregando o sustituyendo las diferentes partes de la red con la mínima afectación posible al resto de la misma. Esta arquitectura se muestra en la Figura 2.1.

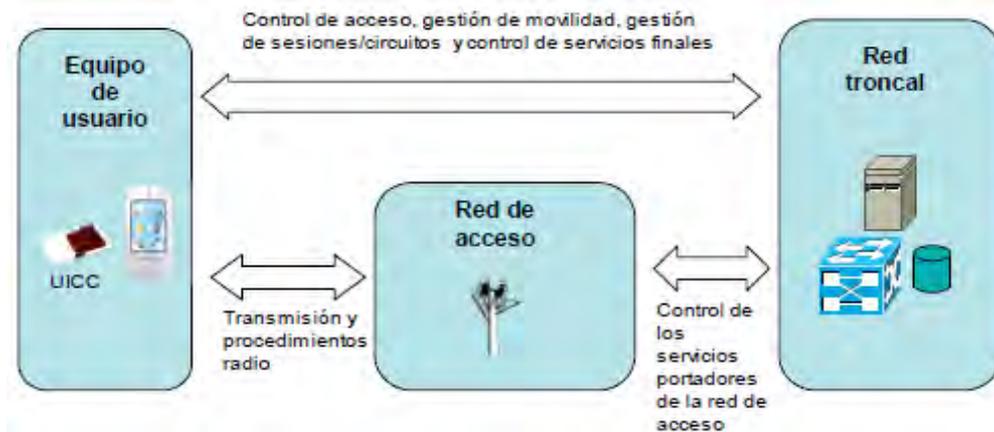


Figura 2.1 Arquitectura de una red celular [6]

Esta arquitectura de red básica puede ser modificada al interactuar con redes celulares y redes de comunicación. En la Figura 2.2 se muestran dos escenarios representativos de la provisión de servicios de comunicación a través de redes de comunicaciones móviles celulares. En el escenario (a) se ilustra una red celular que sustenta servicios de comunicación (por ejemplo, llamadas de voz) entre los equipos de usuario conectados a ella. En el escenario (b) se muestra la provisión de los servicios de comunicación entre equipos de usuario operando en redes celulares diferentes interconectadas entre sí mediante redes de tránsito.

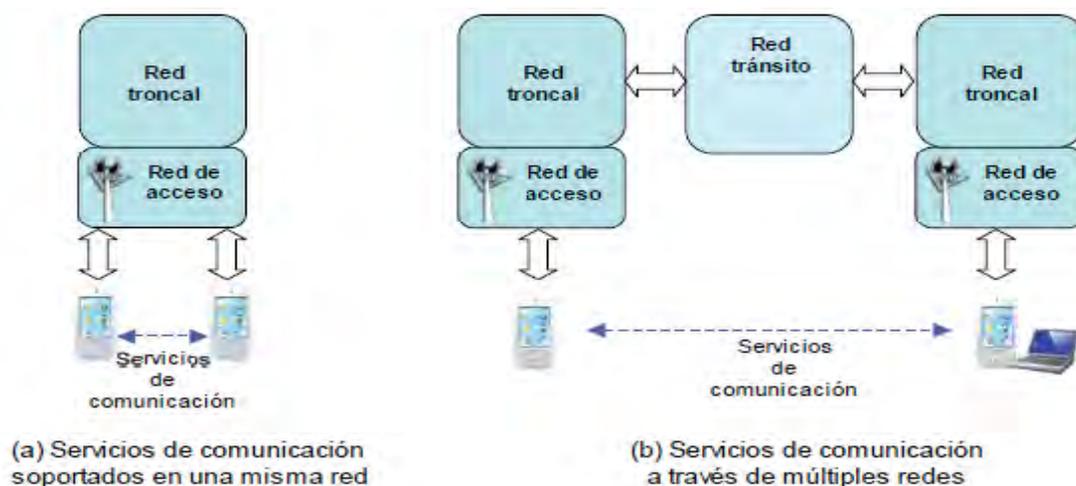


Figura 2.2 Escenarios de provisión de servicios de comunicación en redes celulares [6]

En el mismo aspecto, en la Figura 2.3 se representa un escenario ilustrativo de la provisión de servicios entre equipos conectados a redes celulares y equipos localizados en otras redes (por ejemplo, red telefónica, Internet, etc.).

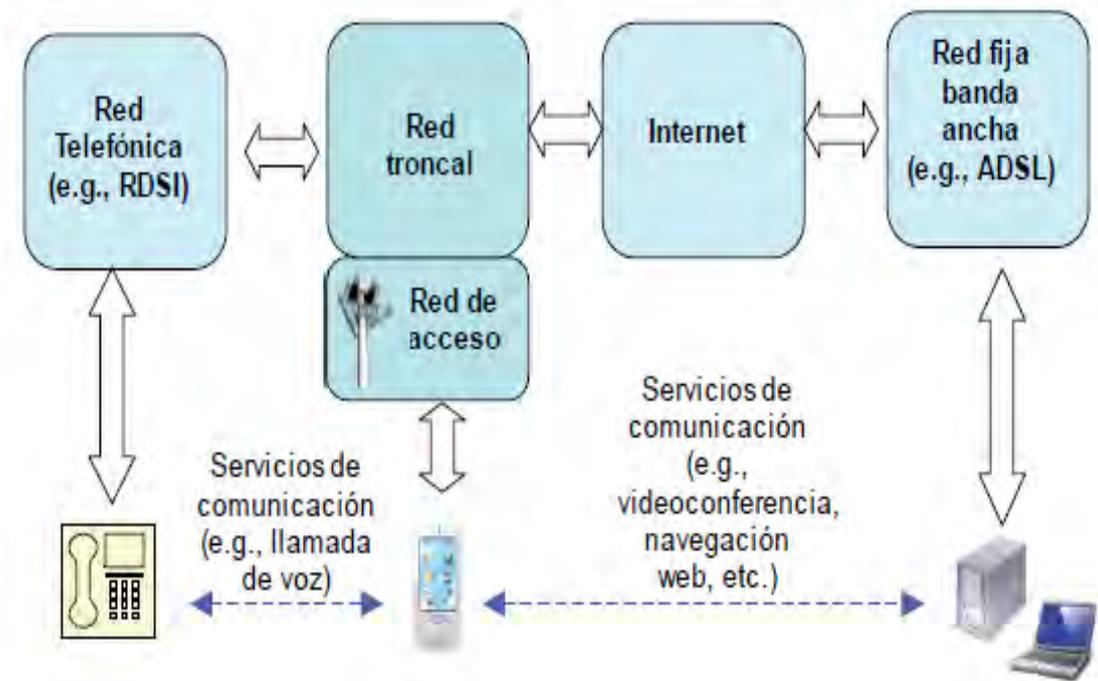


Figura 2.3 Escenario de provisión de servicios de comunicación entre redes celulares y otras redes [6]

2.2 ARQUITECTURA DE UNA RED LTE

La arquitectura de una red de sistema LTE es conocida formalmente en las especificaciones 3GPP como Evolved Packet System. Esta red se adapta a la arquitectura genérica descrita en el apartado anterior. Sus principales características son:

- _ Arquitectura simplificada dirigida hacia una red IP.
 - _ Optimiza la calidad de servicios en la red.
 - _ Un punto de concentración común y un nodo de compuerta (GW) para todas las tecnologías de acceso.
 - _ Soporte para múltiples sistemas, tales como: GPRS, WiMAX.
 - _ Movilidad entre diferentes redes de acceso de radio.
 - _ Servicios basados en conmutación de paquetes.
 - _ Menores latencias.
 - _ Mayores velocidades.
 - _ Mejora del costo-eficiencia.
- Una red LTE está dividida en los siguientes componentes:
- _ E-UTRAN: Red de Acceso de Radio Terrestre Evolucionada.
 - _ EPC: Núcleo de Paquetes Evolucionado.

La Figura 2.4, representa tanto los elementos funcionales como las interfaces que forman parte del EPS y su relación con otras redes de acceso.

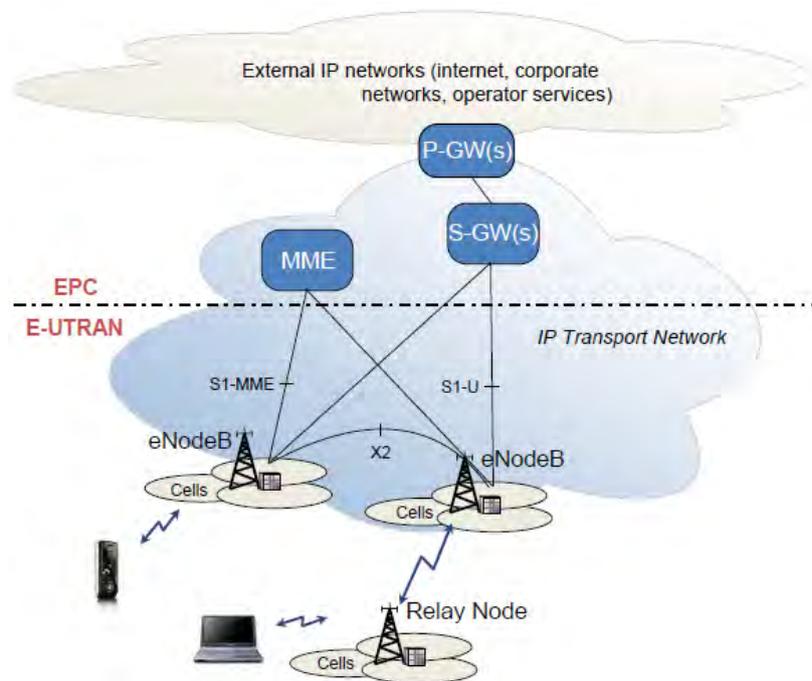


Figura 2.4 Arquitectura de una red LTE [7]

Finalmente, aunque no quede reflejado en la Figura 2.4, es importante destacar que la interconexión de los diferentes equipos físicos donde se ubicarían las funciones tanto de la EPC como de la E-UTRAN, se realiza mediante tecnologías de red basadas en IP. De esta forma, la red física que se utiliza para interconectar los diferentes equipos de una red LTE, y que se denomina comúnmente como red de transporte, es una red IP convencional. Por lo tanto, la infraestructura de una red LTE, además de los equipos propios que implementan las funciones del estándar 3GPP, también integra otros elementos de red propios de las redes IP tales como routers, servidores DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) para la configuración automática de las direcciones IP de los equipos de la red LTE y servidores DNS (Domain Name Server) para asociar los nombres de los equipos con sus direcciones IP.

2.2.1 RED DE ACCESO EVOLUCIONADA (E-UTRAN)

La Red de Acceso Radio Evolucionada consta de un único elemento llamado evolved NodeB (eNB) que constituye la estación base de E-UTRAN. 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 y Node B) y equipos controladores

(BSC y RNC).

De esta manera, en una red LTE los eNB se encargan de conectar a los equipos de usuario (UE) con la EPC. Para realizar estas interconexiones el eNB se comunica con el resto de elementos del sistema mediante tres interfaces señaladas en la Figura 2.5.

- _ E-UTRAN Uu.
- _ S1.
- _ X2.

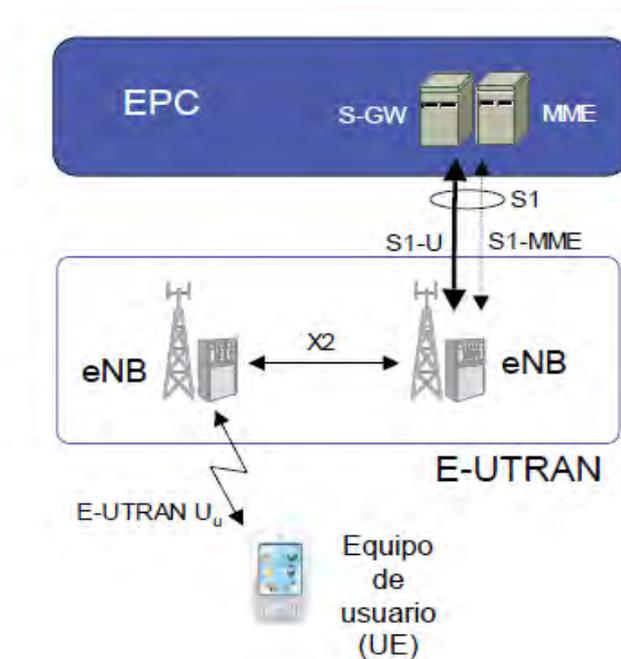


Figura 2.5 Red de acceso E-UTRAN [6]

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

La interfaz S1 permite la conexión entre el eNB y la EPC. Esta interfaz a su vez está subdividida en dos interfaces diferentes: S1-MME para soportar 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 (por ejemplo, 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 (por ejemplo, configuración de la operatividad del eNB desde la 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 eNB con dos nodos diferentes de la EPC. Así, mediante la interfaz S1-MME, el eNB se comunica con una entidad de la EPC encargada únicamente de sustentar las funciones relacionadas con el plano de control, dicha entidad se denomina Mobility Management Entity (MME). Por otro lado, mediante la interfaz S1-U, el eNB se comunica con otra entidad de la EPC encargada de procesar el plano de usuario (dicha entidad se denomina Serving Gateway, S-GW). Esta separación entre entidades de la EPC 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.

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

En la Tabla 2.1 se resumen las entidades de red e interfaces de E-UTRAN.

Entidades de red	Denominación	Descripción
		Evolved NodeB (eNB)
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)

Tabla 2.1 Entidades e interfaces en la E-UTRAN

A. EVOLVED NODE B (eNB)

El eNB dentro de la arquitectura E-UTRAN integra todas las funciones de la red de acceso. Por ello, en el eNB terminan todos los protocolos específicos de la interfaz de radio. Mediante dichos protocolos, el eNB realiza la transmisión de los paquetes IP hacia/desde los equipos de usuario junto con los mensajes de señalización necesarios para controlar la operación de la interfaz radio. El servicio de transferencia de paquetes IP entre un eNB y un equipo de usuario se denomina formalmente como servicio portador de radio (Radio Bearer, RB). El eNB mantiene un contexto de cada uno de los equipos de usuario que tiene conectados. En dicho contexto se almacena la información necesaria para mantener los servicios de E-UTRAN activos (información sobre el estado del equipo de usuario, servicios portadores activos, información de seguridad, capacidades del terminal, etc.).

Entre las principales funciones del eNB, tenemos:

- _ La gestión de los recursos radio. El eNB alberga funciones de control de admisión de los servicios portadores de radio, control de movilidad (por ejemplo, decisión de realizar un handover), asignación dinámica de los recursos radio tanto en el enlace ascendente como descendente (denominadas funciones de scheduling), control de interferencias entre estaciones base, control de la realización y del envío de medidas desde los equipos de usuario que puedan ser útiles en la gestión de recursos, etc.
- _ Selección dinámica del MME en la EPC cuando un terminal se registra en la red LTE (ver Figura 2.6).

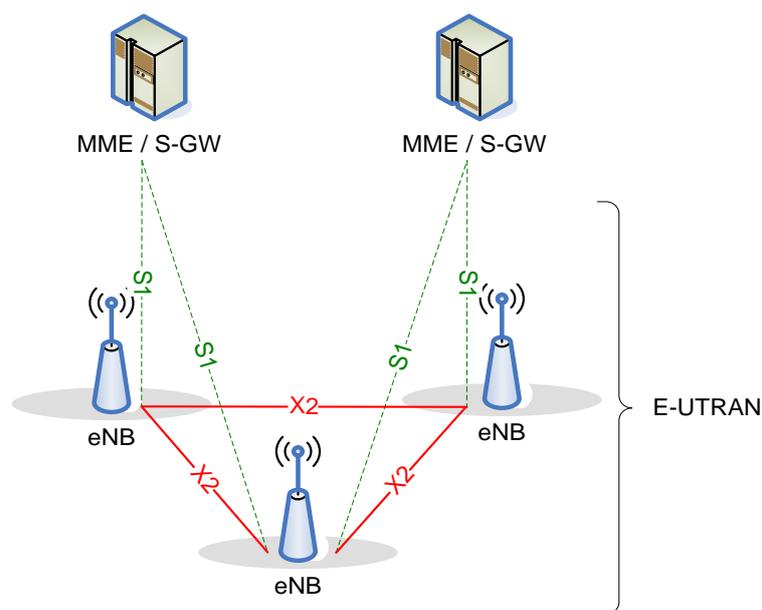


Figura 2.6 Selección dinámica de la MME [8]

Esta función otorga un grado de flexibilidad muy importante en la operatividad de la red. En E-UTRAN, a diferencia de arquitecturas más jerarquizadas como GERAN o las primeras versiones de UTRAN, un eNB puede estar conectado simultáneamente a múltiples MMEs de la EPC.

El conjunto de MMEs a los que tiene acceso un eNB se denomina su pool de área. Así, mediante la selección de qué MME va a controlar el acceso de cada usuario, es posible balancear la carga de señalización entre diferentes MMEs así como aumentar la robustez del sistema frente a puntos de fallo críticos. Esta opción se soporta mediante lo que se denomina la interfaz S1 flexible (S1-flex).

- _ Comprensión de la cabecera IP y encriptación del flujo de datos del usuario.
- _ Al igual que la posibilidad de interactuar con múltiples MMEs, un eNB puede enviar/recibir paquetes IP de los usuarios a los que sirve a través de diferentes pasarelas S-GW en la EPC. Ello conlleva a que el eNB albergue funciones de encaminamiento del tráfico de los usuarios hacia el S-GW correspondiente. La elección del S-GW en este caso compete al MME y no al eNB. Un eNB puede gestionar una o varias celdas. Un caso típico es el uso de sectorización de forma que el eNB ubicado en un emplazamiento soporta tantas celdas como sectores.
- _ Programación y transmisión de mensajes buscapersonas (originado desde el MME).
- _ Programación y transmisión de información de difusión (originado desde el MME o O&M).
- _ Medición y configuración de la información para la movilidad y programación.

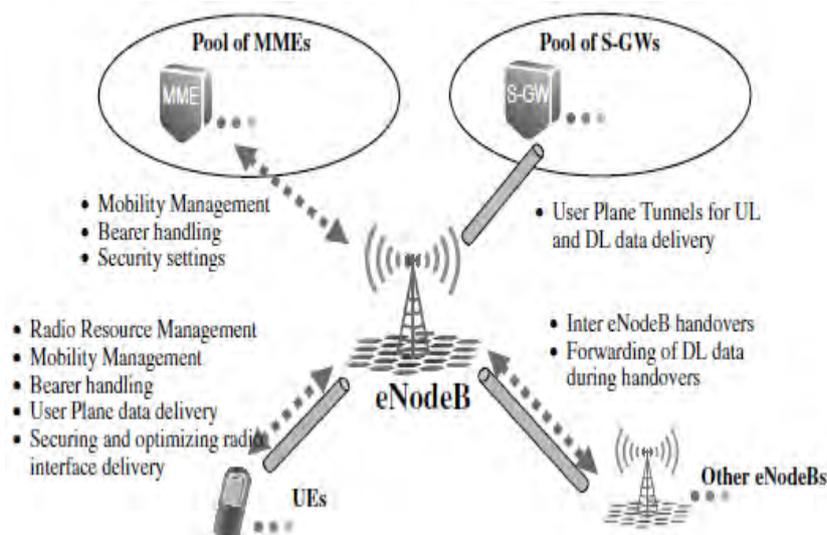


Figura 2.7 Conexiones del eNB con otros nodos lógicos y principales funciones [9]

En la Figura 2.7 se muestran las principales funciones descritas del eNB.

B. INTERFACES

➤ Interfaz Uu

La interfaz Uu, también llamada interfaz de radio, permite la conexión entre el equipo de usuario y el eNB. Soporta básicamente tres tipos de mecanismos de transferencia de la información en el canal de radio: difusión de señalización de control, envío de paquetes IP y transferencia de señalización de control dedicada entre un equipo de usuario y el eNB. En la Figura 2.8 se representan estas funciones.

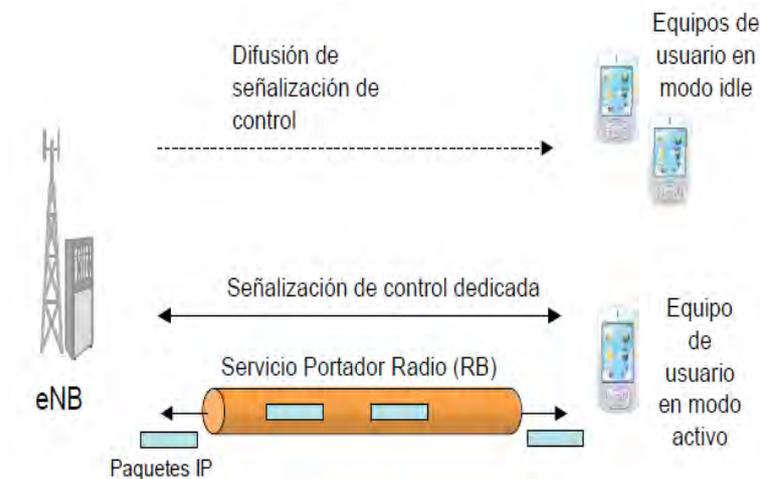


Figura 2.8 Mecanismos de transferencia de información en la interfaz de radio [6]

- **Difusión** (broadcast) de señalización de control en la zona de cobertura de la celda. La información enviada permite a los equipos de usuario detectar la presencia del eNB y conocer sus parámetros básicos de operación (por ejemplo, potencia máxima que pueden utilizar los equipos de usuario en la celda) así como la identidad de los operadores de red a los que puede accederse a través del eNB. La información difundida corresponde tanto a información específica de la red de acceso (denominada información del Access Stratum, AS) como de la EPC (denominada información del Non Access Stratum, NAS). La difusión de señalización de control también sirve para forzar que un equipo de usuario, que no tenga una conexión de control establecida con el eNB, inicie un acceso a la red (función de aviso o paging).
- **Transferencia de paquetes IP** de los usuarios a través del canal de radio. Los servicios de transferencia entre un eNB y un equipo de usuario se denominan servicios portadores de

radio (Radio Bearers, RB). Es importante destacar que los servicios portadores de radio de E-UTRAN han sido diseñados específicamente para soportar tráfico IP y no permiten la transferencia de otros protocolos (por ejemplo, paquetes X.25, tramas Ethernet, etc.). Por ello, de cara a la optimización del envío de tráfico IP a través de la interfaz de radio, los servicios portadores albergan funciones como la compresión de cabeceras de los paquetes IP que permiten reducir el número de bytes enviados por la interfaz de radio (las cabeceras de los paquetes IP pertenecientes a un mismo tipo de tráfico contienen un gran número de parámetros idénticos, por ejemplo, direcciones origen y destino, por lo que no resulta necesario enviar todos los bytes de la cabecera IP en cada uno de los paquetes).

- **Transferencia de señalización de control dedicada** entre el eNB y un equipo de usuario. El establecimiento de una conexión de control dedicada resulta imprescindible para gestionar el uso de los servicios portadores de radio así como para realizar cualquier gestión de señalización con la EPC (por ejemplo, registro del terminal en la red). La conexión de control se soporta mediante el protocolo Radio Resource Control (RRC). A través de dicho protocolo se gestionan, además del establecimiento, modificación y liberación de los servicios portadores de radio entre el eNB y el equipo de usuario, otros mecanismos claves para la gestión eficiente de los recursos de radio. Entre dichos mecanismos cabe citar el control y envío de medidas de radio desde los terminales hacia el eNB y el mecanismo de handover, que permite que un equipo de usuario cambie de celda manteniendo activos tanto la conexión de control como los posibles servicios portadores de radio que esté utilizando. Los terminales que mantienen una conexión de control con E-UTRAN se dice que se encuentran en modo conectado o activo, en contraposición al denominado modo inactivo en que el terminal no tiene una conexión RRC y básicamente se encuentra monitorizando la información de control difundida por la red.

Respecto al envío de paquetes de usuario, cada servicio portador tiene asociado un perfil de QoS que debe satisfacerse mediante la correcta configuración de los protocolos de radio, así como, la adecuada operación de los mecanismos de gestión de recursos de radio (por ejemplo, scheduling).

La información enviada por la interfaz de radio puede protegerse mediante funciones de cifrado que proporcionen confidencialidad e integridad. El servicio de confidencialidad permite que la información sea enviada de forma que ningún otro equipo que decodifique la señal transmitida por el canal de radio sea capaz de conocer la información en claro. El servicio de integridad evita que la información transmitida pueda ser alterada de forma

malintencionada en el camino entre el eNB y el equipo de usuario (por ejemplo, equipo de radio que se ubique en medio de la transmisión). Las funciones de cifrado se aplican tanto al tráfico de usuario (paquetes IP) como a los mensajes de señalización RRC utilizados en la conexión de control dedicada.

Las claves secretas necesarias para realizar las funciones de seguridad se obtienen a través de los mecanismos de autenticación y gestión de claves.

➤ Interfaz S1

El plano de usuario de esta interfaz, denominado S1-U (S1 User Plane), proporciona un servicio de transferencia de datos de usuario entre el eNB y el S-GW sin garantías de entrega (se basa en UDP) y no soporta ni mecanismos de control de errores ni de control de flujo. Este servicio de transferencia a través de la interfaz S1-U se denomina servicio portador S1 (S1 bearer).

El plano de control, denominado S1-MME o también S1-C, se utiliza para soportar un conjunto de funciones y procedimientos de control entre el eNB y el MME. Entre los procedimientos soportados en la interfaz S1 destacan:

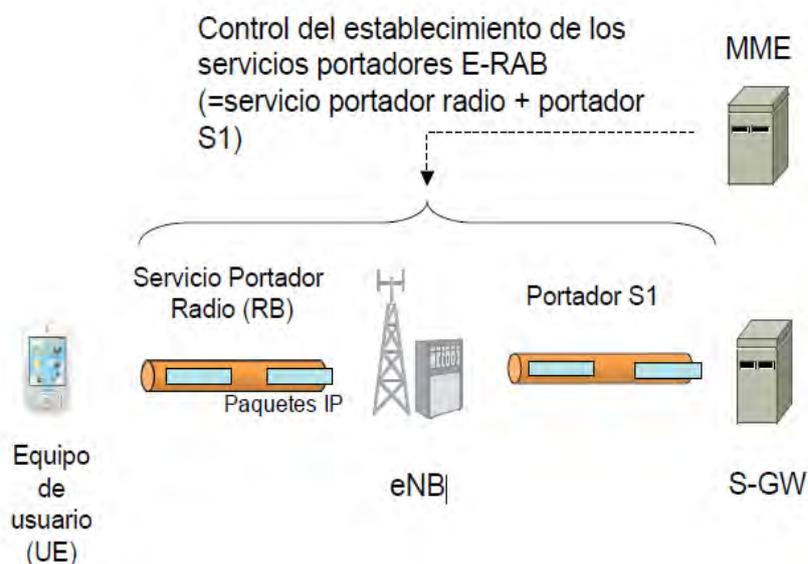


Figura 2.9 Control de los servicios portadores radio y S1 mediante la interfaz S1-MME [6]

- **Procedimientos para establecimiento, modificación y liberación de recursos** de los servicios portadores tanto en la interfaz de radio (servicio portador de radio o RB) como en la interfaz S1 (S1 bearer). La concatenación de un servicio portador de radio y un servicio portador S1 constituye el servicio portador completo que ofrece la red de acceso E-UTRAN y que se denomina E-RAB (E-UTRAN Radio Access Bearer). Es importante

tener en cuenta que en LTE, el establecimiento de estos servicios portadores que constituyen el plano de usuario para la transferencia del tráfico IP se controlan desde la red troncal, en particular desde el MME. Por tanto, en LTE no se permite que un eNB o el propio equipo de usuario puedan iniciar por su cuenta el establecimiento de un servicio portador de radio. En la Figura 2.9 se ilustra dicho control del plano de usuario por parte del MME.

- **Procedimientos de handover del eNB.** Si la red E-UTRAN decide que un terminal debe cambiar de eNB en el transcurso de una conexión, y no existe una interfaz X2 entre los dos eNBs involucrados, la interfaz S1-MME se utiliza para articular el procedimiento de handover. De esta forma, a través de la interfaz S1-MME, la MME puede establecer un nuevo contexto en el eNB destino asociado al terminal que va a realizar el cambio con toda la información relativa a la configuración de los servicios portadores que tiene establecidos el usuario, así como, las claves de seguridad. De esta forma, el re-establecimiento del servicio a través del nuevo eNB puede hacerse mucho más rápidamente ya que se evita el tener que ejecutar de nuevo los mecanismos para el establecimiento de los servicios portadores en la interfaz radio así como los mecanismos de seguridad.
- **Procedimiento de aviso (Paging).** Una de las funciones básicas de la MME es la gestión de la localización de los equipos de usuario en la red. La gestión de localización permite conocer con cierta resolución en qué eNB o conjunto de eNBs (denominados áreas de seguimiento, Tracking áreas) puede ser localizado un usuario que se encuentre en modo inactivo, es decir, que no tenga establecida una conexión de control RRC con ningún eNB. Por ello, cuando el MME quiere forzar que un usuario en modo inactivo pase a modo activo, a través de la interfaz S1-MME se ordena la ejecución del mecanismo de aviso en todos los posibles eNBs en los que espera encontrar al terminal.
- **Procedimiento de envío de forma transparente entre la MME y el eNB** de los mensajes de señalización de control que fluyen entre la MME y el equipo de usuario. Dichos mensajes corresponden a los protocolos denominados como protocolos NAS (Non Access Stratum).

Como se mencionó anteriormente en la descripción de las funciones de un eNB, la interfaz S1 permite que un eNB pueda estar conectado simultáneamente a múltiples equipos de la EPC (múltiples MMEs y/o múltiples S-GWs). Esta característica se denomina comúnmente como S1-flex y presenta varias ventajas:

- _ La red es más robusta a fallos de los nodos de la red troncal: el correcto funcionamiento

de un eNB no está ligado a un único nodo de la red troncal. De esta forma, aunque se produzca un malfuncionamiento o parada de un nodo de la red troncal, los eNBs afectados pueden seguir ofreciendo servicio a través de otros nodos de la red troncal.

_ Un eNB puede proporcionar acceso a nodos de redes troncales de diferentes operadores de red que comparten la red de acceso.

_ Cada terminal registrado en la red LTE tiene asociado un nodo MME que realiza el “seguimiento” del estado de dicho terminal. La frecuencia a la que debe cambiarse la MME que controla el servicio de un determinado equipo de usuario puede verse reducida gracias a la posibilidad de seguir accediendo la misma MME desde un conjunto mayor de eNBs. Esta reducción del número de cambios de MME conlleva una reducción de la señalización en la red troncal necesaria para transferir la información de los usuarios de la base de datos HSS a la MME que les da servicio.

_ Es posible desplegar estrategias de balanceo de carga entre E-UTRAN y los nodos de la EPC, atendiendo tanto a las capacidades de procesado de dichos nodos como a la capacidad de los enlaces de la red de transporte entre E-UTRAN y la EPC.

➤ **Interfaz X2**

El plano de usuario de la interfaz X2 también proporciona un servicio de transferencia de datos de usuario entre eNBs sin garantías de entrega y sin soporte de mecanismos de control de errores y de control de flujo. La transferencia de datos de usuario entre eNBs se realiza únicamente durante los procedimientos de handover en los que los paquetes de usuario almacenados en el eNB antiguo se transfieren al eNB nuevo. De esta forma, el cambio de eNB asociado a un procedimiento de handover puede resultar más transparente al usuario ya que se reduce la posible pérdida de paquetes durante el proceso. Nótese que, sobre todo en servicios de datos, el eNB antiguo podría tener acumulados en su buffer de transmisión de paquetes IP del usuario en el momento del cambio. Dichos paquetes, cuando el usuario deja de estar accesible a través del eNB antiguo, podrían simplemente descartarse, con la consiguiente penalización en retardo y posible reducción en la tasa de transferencia del servicio asociado ya que la recuperación de dicha información recaería en la operación de las capas superiores (por ejemplo, protocolo TCP en la capa de transporte). En cambio, si la propia red es capaz de transferir los paquetes IP del eNB antiguo al eNB nuevo, el impacto en el servicio puede reducirse notablemente.

Las principales funciones y procedimientos soportados en la interfaz X2, en el plano de control son:

_ Soporte del mecanismo de handover entre eNBs. En concreto, a través del plano de control se realiza la transferencia del contexto de un usuario del eNB antiguo al nuevo y se controla el mecanismo de transferencia de paquetes IP en el plano de usuario de X2. El contexto de usuario contiene información relativa a los servicios portadores de radio que tiene establecidos el usuario: claves de seguridad y datos sobre las capacidades del terminal.

_ Indicación del estado de carga del eNB. A través de dicha interfaz, eNBs que tengan celdas vecinas pueden transferirse información para llevar a cabo funciones de gestión de recursos de radio como la coordinación de interferencias entre celdas que operen en el mismo canal.

C. PRINCIPIOS GENERALES DE LA ARQUITECTURA E-UTRAN

Los principios generales que rigen la definición de la arquitectura E-UTRAN, así como las interfaces de E-UTRAN son los siguientes:

- _ Separación lógica de la señalización y las redes de transporte de datos.
- _ Las funciones del E-UTRAN y EPC están completamente separados de las funciones de transporte.
- _ La movilidad para la conexión RRC está totalmente controlada por el E-UTRAN.
- _ En la definición de las interfaces E-UTRAN se consideró el principio: la división funcional a través de las interfaces deberá tener tantas opciones como sean posibles.
- _ Las interfaces deben basarse en un modelo lógico de la entidad controlada a través de esta interfaz.
- _ Un elemento de la red física puede aplicar múltiples nodos lógicos.

2.2.2 EVOLVED PACKET CORE (EPC)

El núcleo de red definido en el sistema SAE es una evolución radical del núcleo de la red GSM/GPRS, y por esto tiene un nuevo nombre, Evolved Packet Core (EPC). El sistema SAE sólo abarca el ámbito de conmutación de paquetes, no el de conmutación de circuitos. Esto va acorde con la tendencia de obtener redes puramente IP, la filosofía de reducir al mínimo el número de nodos también reina en la normalización del núcleo de red. Otro factor clave considerado en el diseño de esta arquitectura ha sido la posibilidad de acceder a sus servicios a través de otras redes de acceso tanto 3GPP (UTRAN y GERAN) como fuera del ámbito del 3GPP (cdma2000, WiMAX). En consecuencia, la red EPC comenzó como una arquitectura de un solo nodo con todas las funciones en el mismo, excepto el Home Subscriber Server (HSS), el cual se mantiene fuera del nodo. El HSS es

un nodo de base de datos correspondiente a el HLR del núcleo de red GSM/WCDMA. En la Figura 2.10 se muestra como el EPC se ajusta en el total de la arquitectura.

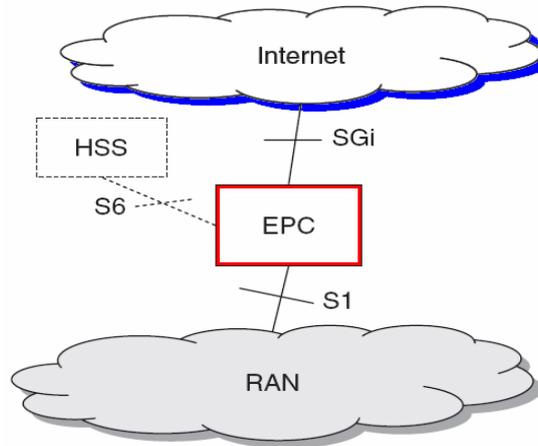


Figura 2.10 EPC [10]

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

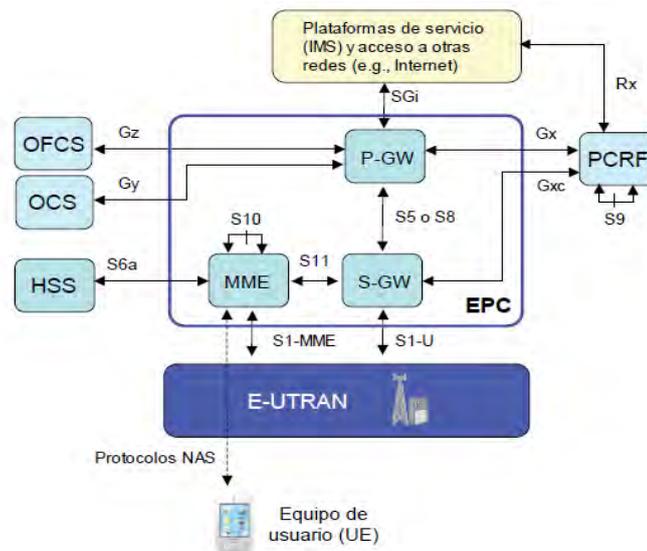


Figura 2.11 Arquitectura básica de la EPC [6]

Tres son las entidades básicas para soportar la movilidad (ver Figura 2.11):

- _ MME (Mobility Management Entity.)
- _ S-GW (Serving Gateway)
- _ PDN (Packet Data Network) Gateway.

Estas tres entidades, junto con la base de datos principal del sistema 3GPP denominada Home Subscriber Server, constituyen los elementos básicos para la provisión del servicio de conectividad IP entre los equipos de usuario conectados a través de E-UTRAN y redes externas a las que se conecta la EPC.

Mientras que la MME es la responsable de la señalización y funciones en el plano de control, los dos Gateways se emplean para las funciones asociadas con el plano del usuario.

Por medio del interface S1 la red de acceso radio se interconecta con la EPC. Dicho interface consta del plano de control S1-MME entre el eNB y la MME, y del plano de usuario S1-U entre el eNB y el S-GW. La relación múltiple de esta interface S1 proporciona redundancia y reparto de carga, creándose pools que permiten conectar cada eNB a varios MMEs y S-GWs.

La MME termina el plano de control de los equipos de usuario conectados a la red LTE mediante los protocolos NAS y controla las funciones de transferencia del plano de usuario de red LTE a través de la interfaz S11 con el S-GW. Asimismo, la MME se conecta a la entidad HSS a través de la interfaz S6a para acceder a la información asociada a los usuarios de la red que estén autorizados a establecer conexiones a través de E-UTRAN. Las MMEs también pueden comunicarse entre ellas mediante la interfaz S10.

La interconexión de la EPC con redes externas o plataformas de servicio (por ejemplo, plataformas IMS) se realiza a través de la PDN-GW mediante la interfaz SGi. La PDN-GW soporta funciones, entre otras, de asignación de direcciones IP a los equipos de usuario y mecanismos de control de los parámetros de calidad de servicio de las sesiones de datos establecidas a través de la red LTE. Internamente, la PDN-GW se conecta al S-GW mediante la interfaz S5, cuando ambas pertenecen al mismo operador, y mediante S8, cuando éstas se encuentran en redes de operadores diferentes y se proporciona un servicio de roaming o itinerancia.

La entidad de red PCRF (Policy and Charging Rules Function) constituye un elemento clave de todos los sistemas 3GPP, y en particular, del sistema LTE. PCRF forma parte del marco funcional denominado PCC (Policy and Charging Control) que se utiliza para

controlar los servicios portadores que ofrece la red LTE (por ejemplo, activación y determinación de los parámetros de QoS asociados a cada servicio portador) así como realizar el control de los mecanismos de tarificación (por ejemplo, tarificación on-line, offline, medición del volumen de datos transferido, tiempo transcurrido, etc.). Así pues, mediante la interfaz Gx, el PCRF gestiona los servicios portadores EPS de la red LTE mediante el envío de unas reglas de uso (por ejemplo, reglas PCC) que sirven para configurar la operación de unas funciones específicas del plano de usuario de la PDN-GW (por ejemplo, funciones que limitan la tasa de transferencia en bits/s de los servicios portadores). La entidad PCRF es accesible desde las plataformas de servicios externas como IMS mediante la interfaz Rx. Dicha interfaz ofrece la funcionalidad de control necesaria para que los servidores de aplicación externos puedan proporcionar información asociada a los servicios finales a los que accede el usuario junto con las características y requerimientos de QoS. En la Tabla 2.2 se muestra un resumen de las entidades e interfaces de LTE descritas hasta el momento.

Finalmente, las entidades OFCS (Offline Charging System) y OCS (Online Charging System) constituyen el núcleo del sistema de tarificación de la red. Ambas entidades interactúan directamente con la PDN-GW mediante la interfaz Gz, en el caso de OFCS, y Gy, en el caso de OCS. El marco de tarificación soportado es un marco flexible que permite desplegar modelos de tarificación en base a diferentes parámetros tales como tiempo de uso, volumen de datos, eventos, etc.

A. SAE GATEWAY

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

➤ Serving Gateway (S-GW)

Esta entidad actúa de pasarela del plano de usuario entre E-UTRAN y la red troncal EPC. Un usuario registrado en la red LTE dispone de una entidad S-GW asignada en la EPC a través de la cual transcurre su plano de usuario. La asignación de la pasarela S-GW responde a criterios geográficos, así como, de balanceo de cargas. Entre las principales funciones del S-GW podemos destacar:

- El S-GW proporciona un punto de anclaje respecto a la movilidad del terminal entre eNBs. De esta forma, en un proceso de handover entre dos eNBs, el cambio del plano de u-

Entidades de red EPC	Denominación	Descripción
	MME	Nodo que canaliza el plano de control de la red LTE.
	S-GW	Punto de anclaje del plano de usuario en la EPC.
	PDN-GW	Entidad para la interconexión con redes externas.
Entidades comunes a las redes 3GPP	Denominación	Descripción
	HSS	Base de datos global del sistema (contiene datos de suscripción de usuarios).
	PCRF	Elemento central del sistema de control de uso de la red y control de tarificación.
	OCS	Nodo de control para la provisión de servicios que requieren tarificación online.
	OFCS	Nodo de recogida de la información de tarificación para su posterior transferencia al sistema de facturación.
Interfaces	Denominación	Entidades de red asociadas
	S1-MME	MME - E-UTRAN
	S1-U	S-GW - E-UTRAN
	SGi	PDN-GW - Redes externas
	S6a	MME - HSS
	S5/S8	PDN-GW - S-GW
	S11	MME - S-GW
	S10	MME - MME
	Señalización NAS	UE - MME
	Rx	PCRF - Plataformas de servicios
	Gx	PDN-GW - PCRF
	Gxc	S-GW - PCRF
	Gz	PDN-GW - OFCS
Gy	PDN-GW - OCS	

Tabla 2.2 Entidades e interfaces de la EPC [6]

usuario puede únicamente derivar en un cambio del servicio portador S1 entre los eNBs implicados y el S-GW, manteniéndose sin cambios el resto del plano de usuario (camino entre S-GW y PDN-GW).

- La funcionalidad del punto de anclaje también se aplica a la gestión de movilidad con las otras redes de acceso 3GPP. De esta forma, equipos de usuario que se conecten a la red LTE a través de UTRAN o GERAN, disponen también de un S-GW asociado en la EPC por el que fluye su plano de usuario.
- Almacenamiento temporal de los paquetes IP de los usuarios en caso de que los terminales se encuentren en modo inactivo. En la red, el plano de usuario entre S-GW y el equipo de usuario puede “desactivarse” cuando no exista tráfico para transmitir. Es decir, aunque las conexiones y servicios portadores EPS permanezcan activos, un terminal puede encontrarse en estado inactivo y, por tanto, no estar conectado a ningún eNB. Así pues, cuando se recibe tráfico de la red externa dirigido a un usuario en modo inactivo, este tráfico llega hasta el S-GW a cargo de ese usuario, que retiene temporalmente los paquetes IP e inicia (a través de la señalización pertinente con la MME) el re-establecimiento del plano de usuario hasta el equipo de usuario.

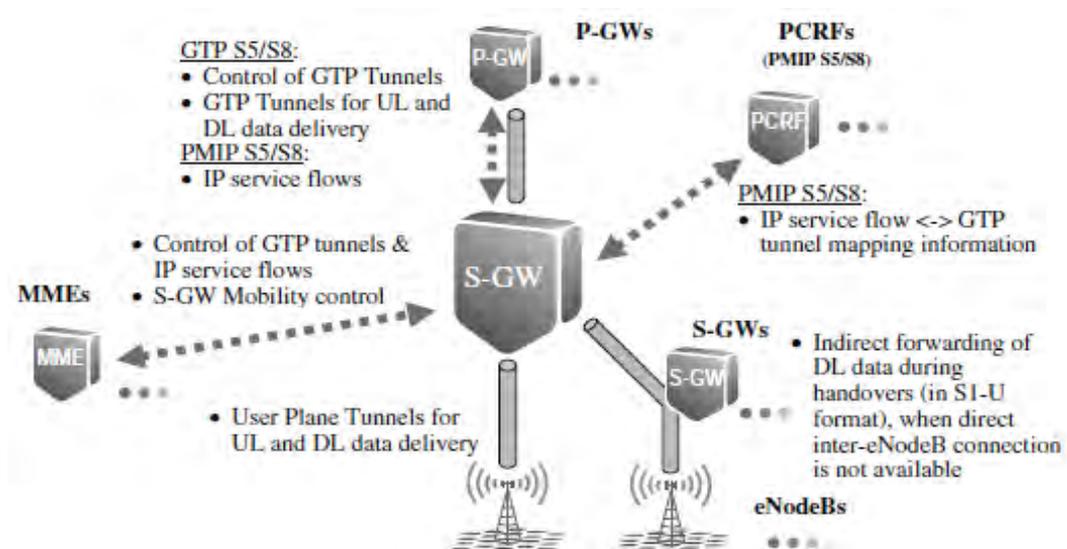


Figura 2.12 Principales funciones y conexiones del S-GW con otros nodos lógicos [9]

- Encaminamiento del tráfico de usuario. Como todo el tráfico de un usuario fluye a través de una pasarela S-GW, ésta alberga la información y funciones de encaminamiento necesarias para dirigir el tráfico de subida (tráfico IP proveniente de los equipos de usuario) hacia la pasarela PDN-GW que corresponda y el tráfico de bajada (proveniente de

las pasarelas PDN-GW) hacia el eNB a través del cual se encuentra conectado el equipo de usuario. Es importante destacar que aunque un usuario puede tener múltiples conexiones establecidas con diferentes PDN-GW de forma simultánea, todo el tráfico atraviesa un único S-GW.

- En caso de ser necesario disponer de información del tráfico de usuario ante un requerimiento judicial, el S-GW se encarga de replicar dicha información.

En la Figura 2.12 se muestran algunas de las principales funciones del S-GW.

➤ **Packet Data Network (PDN-GW)**

Esta entidad es la encargada de proporcionar conectividad entre la red LTE y las redes externas. Es decir, a través de la PDN-GW, un usuario conectado al sistema LTE resulta visible en la red externa. Por tanto, los paquetes IP generados por el usuario se inyectan en la red externa a través de esta pasarela y, viceversa, todo el tráfico IP dirigido a un terminal LTE proveniente de la red externa va a ser encaminado hasta la PDN-GW. Un usuario tiene asignada como mínimo una PDN-GW desde su registro en la red LTE.

Entre las principales funciones de la PDN-GW podemos destacar:

- La asignación de la dirección IP de un terminal utilizada en una determinada red externa se realiza desde la PDN-GW correspondiente. La dirección puede ser una dirección IPv4, IPv6 o bien un par de direcciones (IPv4 e IPv6). El mecanismo de asignación de la dirección se sustenta en la señalización propia de la red LTE (por ejemplo, el terminal recibe la dirección IP a través de los protocolos NAS) o bien en la utilización de protocolos propios de redes IP como DHCP.
- La PDN-GW actúa de punto de anclaje para la gestión de movilidad entre LTE y redes no 3GPP. Esta pasarela alberga funciones de Home Agent (HA) para proporcionar continuidad de servicio en caso de utilizar el protocolo Mobile IPv4 (MIPv4) para gestionar la movilidad entre la red LTE y, por ejemplo, una red WiMAX. Además de MIPv4, la pasarela incluye soporte de movilidad para los protocolos Dual Stack MIPv6 (DSMIPv6) y Proxy MIPv6 (PMIPv6). El tráfico IP que transcurre por la PDN-GW es procesado a través de un conjunto de filtros que asocian cada paquete IP con el usuario y servicio portador EPS correspondiente. Esto permite, por un lado, aplicar las reglas de uso y tarificación antes comentadas, y por otro, aplicar funciones de inspección y verificación de la validez de los paquetes IP que cursa la red (packet screening). De esta forma, la pasarela puede descartar los paquetes IP que sean considerados como tráfico anómalo (por ejemplo, un equipo de usuario envía paquetes con una dirección o puertos para los que no

está autorizado).

- A través del interface S7 se realiza la transferencia de las políticas de calidad de servicio y tarificación que se aplican al tráfico de usuario entre el PCRF y la PDN-GW.

En la Figura 2.13 se muestran algunas de las principales funciones del PDN-GW.

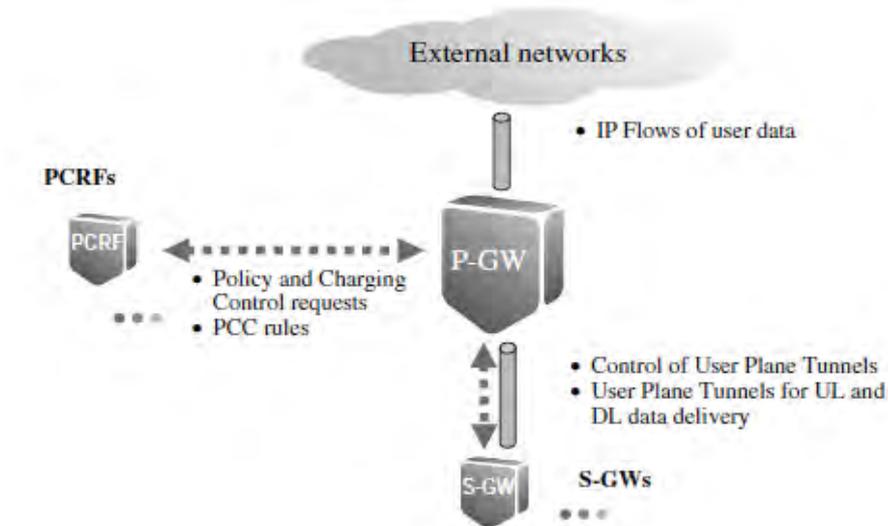


Figura 2.13 Funciones y conexiones de la PDN-GW con otros nodos lógicos [9]

B. MOBILITY MANAGEMENT ENTITY (MME)

La MME es el elemento principal del plano de control de la red para gestionar el acceso de los terminales a través de E-UTRAN. Cualquier terminal que se encuentre registrado en la red y sea accesible a través de E-UTRAN tiene una MME asignada. La elección de la MME se realiza en el proceso de registro y depende de aspectos tales como la ubicación geográfica del terminal en la red (cada MME sirve a un conjunto determinado de eNBs) así como a criterios de balanceo de cargas (gracias al soporte de la interfaz S1-flex). Dicha entidad mantiene un contexto de datos del usuario (por ejemplo, identificadores del usuario, conexiones y servicios portadores EPS activos, claves de seguridad, datos de localización del usuario en la red, etc.) y articula todas las gestiones que se realicen en relación a dicho usuario (por ejemplo, establecimiento de servicios portadores EPS, etc.). La MME asignada a un usuario puede ir cambiando atendiendo a la movilidad de dicho usuario dentro de la zona de servicio de la red.

Las principales funciones de la MME son:

- _ Autenticación y autorización del acceso de los usuarios a través de E-UTRAN. A partir de los datos de usuario obtenidos desde el HSS, la MME se encarga de llevar a cabo el control de acceso a la red mediante la identificación, autenticación y autorización de los

usuarios que se conectan a través de E-UTRAN.

_ Gestión de los servicios portadores EPS. La MME es la encargada de articular la señalización necesaria para establecer, mantener, modificar y liberar los servicios portadores EPS sobre los cuales se sustenta el envío de paquetes IP entre los equipos de usuario y la red externa.

_ Gestión de movilidad de los usuarios en modo inactivo (por ejemplo, terminales que no tienen ninguna conexión de control establecida con E-UTRAN). La MME es la encargada de hacer un seguimiento de la localización de los usuarios dentro del área de servicio de la red. Para ello, se definen unas áreas de seguimiento (Tracking Areas) y unos procedimientos asociados (denominados Tracking Area Update) que permiten disponer de información de localización de todos los usuarios que se encuentren registrados en la red.

_ Señalización para el soporte de movilidad entre EPS y redes 3GPP. La MME de la EPC y la entidad SGSN pueden intercambiarse información relativa a los equipos de usuario conectados bien a través de E-UTRAN o de UTRAN/GERAN para poder gestionar, por ejemplo, mecanismos de gestión de movilidad conjunta (la red troncal GPRS, así como, la red troncal EPC pueden intercambiar información relativa a las áreas de seguimiento). Esta señalización se realiza a través de la interfaz S3 entre MMEs y SGSNs. También, a través de esta interfaz, se gestionan los procedimientos de reubicación del plano de usuario en las entidades de la EPC (por ejemplo, el plano de usuario de un terminal conectado inicialmente a UTRAN y que fluye a través de un determinado SGSN, se reubica hacia un S-GW cuando el terminal cambia de UTRAN a E-UTRAN).

_ Terminación de los protocolos de señalización NAS. Los protocolos NAS fluyen entre el equipo de usuario y el MME que tenga asignado. A través de ellos se soportan los procedimientos relacionados con las funciones de control de acceso a la red, la gestión de las conexiones a redes externas y el establecimiento de servicios portadores EPS, y la gestión de movilidad de los terminales que se encuentran en modo inactivo.

_ Seguridad de señalización NAS.

_ Selección de PDN GW y Serving SW.

_ Selección de MME para handover con intercambio de MME.

_ Portador de las funciones de gestión, incluido el establecimiento dedicado al portador.

_ Roaming.

_ Soporte para la transmisión de mensajes PWS (que incluye ETWS y CMAS).

Disponer de un elemento de red dedicado a la señalización y separado funcionalmente

de los Gateways, aporta a los operadores la ventaja de poder crecer la capacidad de señalización de forma independiente del tráfico de usuario. En la Figura 2.14 se muestran algunas de las principales funciones del MME.

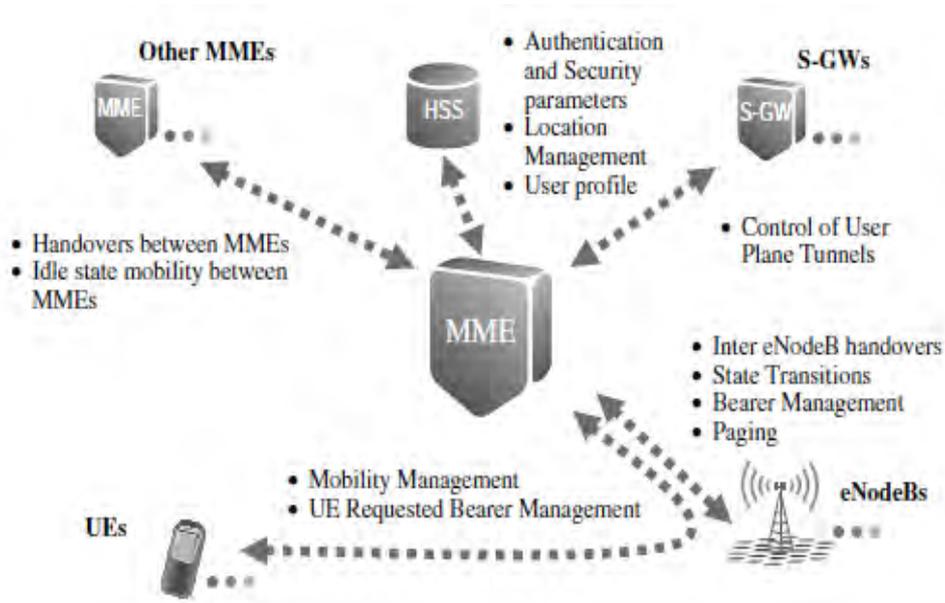


Figura 2.14 Funciones y conexiones de la MME con otros nodos lógicos [9]

C. HOME SUBSCRIBER SERVER (HSS).

El HSS es la base de datos principal del sistema 3GPP que almacena la información de los usuarios de la red. La información contenida en el HSS abarca tanto información relativa a la suscripción del usuario (por ejemplo, perfil de suscripción) como información necesaria para la propia operatividad de la red. La base de datos HSS es consultada y modificada desde las diferentes entidades de red encargadas de proporcionar los servicios de conectividad o servicios finales (por ejemplo, MME de la EPC, SGSN de la red GPRS, MSC del dominio de circuitos y también desde servidores de control del subsistema IMS). El HSS contiene tanto información permanente que sólo puede ser cambiada mediante procesos administrativos (por ejemplo, campos creados al dar de alta a un usuario en la red o cambiar las condiciones de su contrato), así como información temporal que cambia a raíz de la propia operación del sistema (por ejemplo, localización del terminal dentro de la zona de servicio del sistema).

Entre la información almacenada en el HSS podemos destacar:

- _ Identificadores universales del usuario (por ejemplo, International Mobile Subscriber Identity, IMSI).
- _ Identificadores de servicio (por ejemplo, Mobile Station ISDN, MSISDN).

- _ Información de seguridad y cifrado (vectores de autenticación).
- _ Información de localización del usuario en la red (identificador de la entidad de control, MME que proporciona el plano de control hacia un determinado usuario).
- _ Información necesaria para la provisión de los servicios de acuerdo con las condiciones establecidas en el contrato de suscripción (por ejemplo, identificador de la red externa y parámetros de calidad de servicio del servicio portador por defecto).

La entidad HSS se estandarizó en 3GPP R5 en base a la integración de dos entidades definidas inicialmente en redes GSM y que se denominan HLR (Home Location Register) y AuC (Authentication Center), a las que se añadieron funciones adicionales necesarias para soportar el acceso y la operativa del sistema LTE.

El HSS abarca:

- _ El subconjunto de funciones de las entidades HLR/AuC necesarias para el funcionamiento del dominio de paquetes EPC, así como GPRS. El acceso a HSS desde la red EPC se realiza desde la MME mediante la interfaz S6a.
- _ El subconjunto de funciones de las entidades HLR/AuC necesarias para el funcionamiento del dominio CS.
- _ Funciones de soporte asociadas a las funciones de control del subsistema IMS como la gestión de información relativa a la suscripción de servicios IMS y el almacenamiento de perfiles de usuario asociados a servicios IMS.

Las entidades de red que acceden a la base de datos HSS para gestionar el acceso al servicio de conectividad de la EPC son las siguientes:

- _ Cuando el acceso se realiza a través de E-UTRAN, el MME es la que interactúa con la base de datos a través de la interfaz S6a.
- _ Cuando el acceso es a través de UTRAN o GERAN, el acceso a HSS se realiza desde el Server GPRS Support Node (SGSN) mediante la interfaz S6d.
- _ Cuando el acceso es a través de redes no 3GPP, el acceso se canaliza a través del servidor AAA mediante la interfaz SWz.

D. INTERFACES

➤ Interfaz SGi

A través de la interfaz SGi se realiza la interconexión de la pasarela PDN-GW de la red LTE con redes externas IP. La red externa puede ser tanto una red pública (por ejemplo, Internet) como cualquier otra red privada (por ejemplo, intranet corporativa, red de un ISP, red interna del propio operador para la provisión de servicios IMS).

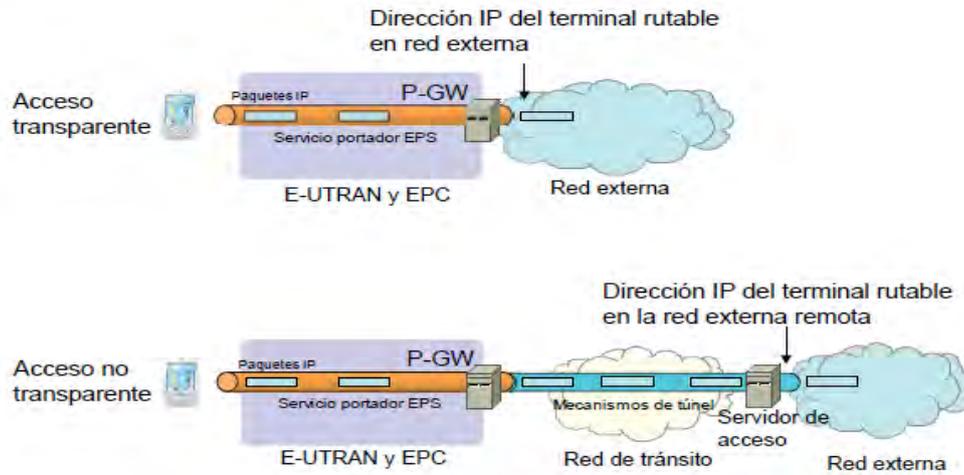


Figura 2.15 Tipos de interconexión a través de SGi [6]

La interfaz SGi es equivalente a la interfaz Gi especificada para la interconexión de la pasarela GGSN del dominio GPRS con redes externas. La interfaz SGi soporta la interconexión tanto a redes IPv4 como IPv6. Desde la perspectiva de la red externa, la PDN-GW es vista como un router IP convencional. Sobre esta base, existen dos modelos básicos de interconexión de la red LTE con la red externa: acceso transparente y acceso no transparente. Estos tipos de interconexión se muestran en la Figura 2.15

- Interconexión transparente, la dirección IP asignada al terminal es válida en la propia interfaz SGi con la red externa, de forma que el terminal es “visible” en la red externa a la que proporciona acceso la pasarela PDN-GW a través de dicha dirección.
- Interconexión no transparente, la red LTE ofrece un acceso a una red externa remota de forma que el espacio de direcciones utilizado por los terminales pertenece al espacio de direcciones de la red externa remota. La conexión entre la red LTE y la red remota admite diferentes soluciones tales como el establecimiento de un túnel IP (por ejemplo, IPsec, GRE, etc.) entre la PDN-GW y el servidor de acceso remoto. En este modelo, puede ser necesario que la PDN-GW participe en, por ejemplo, funciones de autenticación del usuario y asignación de direcciones dinámicas pertenecientes a la red remota.

➤ Interfaces S5 y S8

Las interfaces S5 y S8 proporcionan el soporte para la transferencia de paquetes de usuario entre las pasarelas S-GW y PDN-GW. La interfaz S5 se utiliza en situaciones donde ambas pasarelas pertenecen a la misma red mientras que la interfaz S8 es la utilizada en caso de escenarios de itinerancia (roaming) donde el S-GW pertenezca a la red visitada (denominada Visited PLMN) y la PDN-GW a la red matriz (denominada Home PLMN).

Ambas interfaces S5 y S8 admiten dos implementaciones diferentes: una basada en el protocolo GTP y otra basada en el protocolo PMIPv6. La implementación basada en GTP proporciona funciones de creación/eliminación/modificación/cambio del servicio portador del plano de usuario entre S-GW y PDN-GW de los usuarios conectados a la red LTE. En el caso de la implementación basada en PMIPv6 no se soporta ninguna gestión de servicios portadores entre PDN-GW y S-GW de forma que el servicio portador EPS de la red LTE se extiende desde el equipo de usuario hasta el S-GW (y no hasta la PDN-GW, como sería el caso de utilizar GTP en la interfaz S5/S8). Ello es debido a que el protocolo PMIPv6 está concebido para ofrecer exclusivamente un servicio de movilidad entre el S-GW y la PDN-GW y no dispone de los mecanismos necesarios para señalar parámetros de QoS. Por tanto, las interfaces S5 y S8, en el caso de la variante basada en PMIPv6, básicamente ofrecen un servicio de conectividad entre las pasarelas implicadas de forma que todos los flujos de datos son llevados a través del mismo túnel (sin distinción de servicios portadores).

➤ **Interfaz S11**

Esta interfaz permite controlar la operativa del plano de usuario en la EPC desde la MME. Los procedimientos soportados en esta interfaz permiten la creación, eliminación, modificación y cambio de los servicios portadores que los terminales tienen establecidos a través de la red troncal LTE. En este sentido, dado que la MME es la entidad de control que termina los protocolos NAS con los usuarios, la interfaz S11 permite establecer el nexo del plano de control con las funciones del plano de usuario de la red troncal LTE.

Las acciones a realizar sobre la interfaz S11 tienen sus orígenes en los diferentes eventos relacionados con la señalización entre el terminal y la red troncal (por ejemplo, registro de un terminal en la red LTE, incorporación de un nuevo servicio portador EPS a una conexión, establecimiento de una nueva conexión con otra red externa, indicación de handover, etc.) así como en eventos originados desde la propia EPC (por ejemplo, notificación de que existe tráfico almacenado en el S-GW pendiente de ser enviado a un terminal en modo idle, modificación de servicios portadores iniciada por la PDN-GW, etc.).

La interfaz S11 también da soporte al proceso de reubicación del S-GW asociada a un terminal mediante la transferencia de contextos entre la pasarela antigua y la nueva (en el contexto se almacena toda la información relacionada con la configuración del plano de usuario en el S-GW). Así mismo, durante la ejecución de un procedimiento de handover

que implique una reubicación de S-GW, la MME controla los mecanismos de transferencia de paquetes entre las dos posibles pasarelas involucradas.

➤ **Interfaz S10**

La interfaz S10 se define entre dos MMEs. Su principal función es el soporte del mecanismo de reubicación de la MME. De esta forma, cuando la MME que controla a un determinado equipo de usuario debe cambiarse a través de la interfaz S10 se realiza la transferencia del contexto de dicho usuario entre MMEs. En este caso, el contexto de un terminal en una MME abarca toda la información relacionada con la gestión de los servicios portadores y la gestión de movilidad, junto con otra información de seguridad (claves de cifrado), características del terminal (classmark), parámetros de suscripción del usuario obtenidos desde el HSS, etc.

➤ **Interfaz S6a**

Esta interfaz permite la transferencia de información entre la base de datos HSS y la entidad del plano de control MME. A través de la interfaz S6a se da soporte a diferentes funciones:

- Mantenimiento de información de gestión de la localización. La base de datos HSS mantiene unos campos que contienen la identificación de la MME que controla a cada usuario registrado en la red. Esta información la actualiza la MME correspondiente a través de la interfaz S6a. Esta información permite que cuando un terminal se conecta a una MME nueva, dicha MME pueda recuperar información relativa a la MME que previamente brindó servicio al terminal de cara a realizar la reubicación pertinente.
- Autorización de acceso a la red LTE. La base de datos HSS almacena los datos de suscripción de los usuarios que condicionan el acceso a los servicios que ofrece la red. El perfil de suscripción de un usuario se transfiere desde el HSS a la MME, que es la entidad encargada de ejecutar las comprobaciones pertinentes. Así, a modo de ejemplo, la MME puede autorizar o no la conexión de un usuario a una red externa en función de que dicha red externa forme parte de lista de redes externas permitidas según la suscripción del usuario.
- Autenticación de los usuarios. A través de S6a, el nodo MME se descarga la información que permite llevar a cabo el procedimiento de autenticación desde la MME. Esta información se denomina vector de autenticación EPS.
- Notificación y descarga de la identidad de la PDN-GW que utiliza un usuario en una conexión. El almacenamiento en la base de datos HSS de información relativa a las PDN-

GWs que dan servicio al usuario se utiliza para proporcionar soporte a los mecanismos de movilidad entre LTE y otras redes no 3GPP.

La interfaz también soporta escenarios de itinerancia donde una MME de la red de un operador puede acceder a la base de datos HSS de otro operador.

2.2.3 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 2.16 muestra el equipo de usuario LTE.

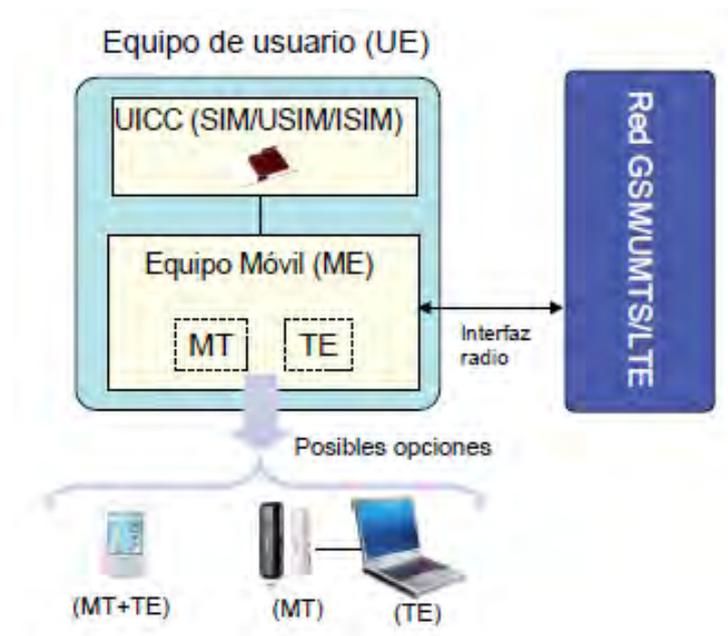


Figura 2.16 Equipo de usuario [6]

El módulo de suscripción de usuario se materializa mediante el uso de una tarjeta inteligente (UICC) que contiene la aplicación que gestiona los datos de suscripción de los usuarios a las redes 3GPP. La aplicación utilizada para acceder a redes GSM se denomina SIM (Subscriber Identity Module), mientras que para el acceso a redes UMTS se conoce como UMTS SIM (USIM). Además de las aplicaciones SIM y USIM, la tarjeta UICC puede contener también una aplicación denominada ISIM (IP Multimedia Services Identity Module) para almacenar los datos necesarios para la operación de los servicios IMS (por

ejemplo, direcciones SIP del usuario). La SIM/USIM está asociada a un usuario y por tanto es quien le identifica en el sistema independientemente del equipo móvil utilizado. La separación entre USIM y ME facilita que un usuario pueda cambiar de terminal manteniendo su identidad. Muchas veces los términos tarjeta inteligente, SIM y USIM se utilizan de forma equivalente. Estrictamente, la tarjeta inteligente únicamente se refiere al circuito integrado y sus capacidades de comunicación y procesado (elementos hardware/software). Como entorno de procesado que es, una tarjeta inteligente puede ejecutar diferentes aplicaciones y dos de ellas son la SIM y USIM. Dichas aplicaciones contienen una estructura de datos (por ejemplo, IMSI del usuario, áreas de seguimiento, etc.) y un conjunto de rutinas específicas (por ejemplo, soporte del mecanismo de autenticación). El diseño de estas aplicaciones se realiza de forma que se garantice compatibilidad con los sistemas previos. Así, una tarjeta con una aplicación USIM, o tarjeta USIM, puede ser utilizada para acceder a una red GSM. En el caso del sistema LTE, se ha mantenido la misma compatibilidad, y además, la aplicación correspondiente sigue denominándose USIM. No obstante, la USIM utilizada para acceder a un sistema LTE, extiende la aplicación USIM de UMTS mediante la inclusión de los parámetros adicionales necesarios para gestionar el acceso a través de LTE (por ejemplo, las nuevas claves de seguridad soportadas en LTE).

El equipo móvil (ME) integra las funciones propias de comunicación con la red celular así como las funciones adicionales que permiten la interacción del usuario con los servicios de la red (un usuario puede ser una persona o bien otro dispositivo electrónico). En este sentido, de cara a introducir un cierto grado de flexibilidad en el diseño del equipo móvil, se ha definido una interfaz que permite que exista una separación física entre el equipo que alberga las funciones propias de la comunicación (MT) y el equipo que se ocupa de la interacción con el usuario (TE), y que puede contener multitud de aplicaciones adicionales no directamente relacionadas con el sistema de comunicaciones móviles. Dicha interfaz consiste en la especificación del conjunto de comandos AT que permiten acceder a los servicios de la red (por ejemplo, establecimiento de una conexión en la red LTE) soportados en el MT desde el TE. En cualquier caso, la separación entre TE y MT es opcional y simplemente pretende flexibilizar el desarrollo de equipos de usuario más complejos. Tal como se ilustra en la Figura 2.16 un ejemplo claro de equipo de usuario que explota la interfaz basada en comandos AT es la utilización de un portátil (TE) y un módem GSM/UMTS/LTE (MT).

La complejidad y prestaciones que puede presentar un equipo de usuario LTE se

clasifica en un conjunto de categorías definidas por 3GPP. Las categorías, denominadas formalmente como ue-Category en las especificaciones del 3GPP, se establecen en función de la capacidad de transmisión del terminal. Así, las categorías tienen en cuenta el grado de soporte de los terminales LTE de mecanismos de multiplexación espacial con múltiples antenas, el uso de determinadas modulaciones, el tamaño en bytes de las colas de transmisión, etc. Además de la categoría del terminal en términos de capacidad de transmisión, un equipo de usuario también admite diferentes implementaciones en base, por ejemplo, a las bandas de frecuencias soportadas y a la integración en el propio terminal de otras tecnologías de acceso radio como terminales multimodo 3GPP ó 802.11.

2.3 PROTOCOLOS DE LA INTERFAZ DE AIRE

La interfaz de aire permite la interconexión y el envío de tráfico y señalización entre el terminal móvil y las estaciones base denominadas evolved NodeB (eNB).

Como es habitual en los equipos de telecomunicación, la estructura de esta torre de protocolos se articula en dos planos:

- El plano de usuario, destinado al envío de la información del usuario (paquetes IP generados por el terminal móvil o destinado a él). Este plano está interconectado al Gateway mediante los denominados Servicios Portadores S1 (por ejemplo, S1 Bearer) y por él se transmiten los mensajes de voz, datos o de radiodifusión y de grupo (Broadcast/Multicast).
- El plano de control o señalización, destinado a transportar los mensajes de control intercambiados entre la red y el terminal móvil, y que permiten un correcto funcionamiento del sistema. Este plano está interconectado al nodo MME, en donde están ubicadas, entre otras, las funcionalidades de gestión de la sesión y la movilidad, y los mecanismos de control de las llamadas.

Desde el punto de vista de la interfaz aire, el envío de paquetes de usuario (paquetes IP) mediante dicha interfaz se gestiona en base al establecimiento de los denominados servicios portadores de radio (por ejemplo, Radio Bearers). Cada servicio portador de radio tiene asociado un perfil de calidad de servicio (QoS) que la torre de protocolos que caracteriza a la interfaz debe garantizar.

La arquitectura general de los protocolos de interfaz de radio LTE se muestra en la Figura 2.17, la cual sólo cubre la parte de protocolo de acceso de radio en LTE.

Además, existen protocolos en la red básica que se encuentran entre la UE y la red principal, pero estos son transparentes a las capas de radio y se conoce generalmente como de señalización NAS.

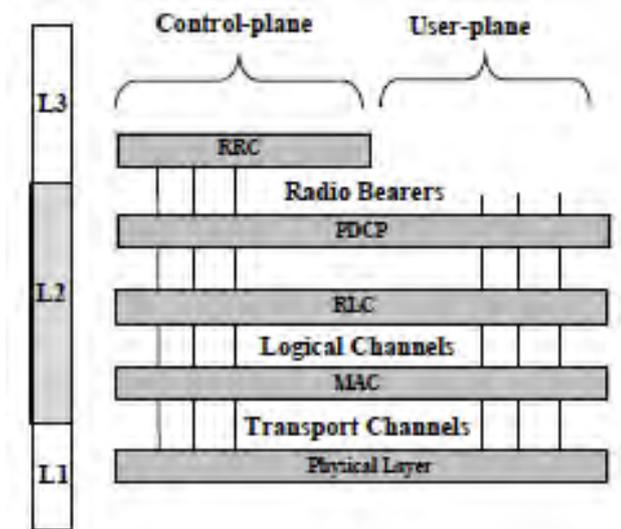


Figura 2.17 Fila de protocolos de radio LTE [9]

Desde el punto de vista del plano de control tenemos los siguientes protocolos:

- Packet Data Convergence Protocol (PDCP) cuyas principales funciones son: compresión de las cabeceras de los paquetes IP, entrega/recepción ordenada de los paquetes IP desde/hacia las capas superiores, que están ubicadas en el Gateway.
- Radio Link Control (RLC), que permite establecer un enlace fiable a través de la interfaz aire.
- Medium Access Control (MAC) que permite un acceso ordenado de los diferentes usuarios (terminales móviles) al medio de transmisión (espectro radioeléctrico).
- Capa física, que proporciona el mecanismo físico de transmisión/recepción a través del espectro radioeléctrico.

Adicionalmente, se tiene el protocolo Broadcast/Multicast Control Protocol (BMC), que es el encargado de almacenar y gestionar la transmisión de los mensajes de grupo (multicast) o radiodifusión (broadcast) hacia el terminal móvil.

A diferencia del plano de usuario, el plano de control incorpora un nuevo protocolo denominado Radio Resource Control (RRC) que es quien se encarga de la gestión de la conexión a nivel radio entre el terminal móvil y la red (eNB), de la configuración de los servicios portadores, y del envío de mensajes relacionados con la movilidad desde/hacia el terminal móvil.

Como se observa en la Figura 2.17, los protocolos de la interfaz de aire están agrupados en capas, similar al modelo OSI. Las capas de protocolos de interfaz de radio LTE por encima de la capa física incluyen protocolos de capa 2; Control de Acceso al Medio

(MAC), Radio Link Control (RLC) y de Paquetes de Datos de Protocolo de Convergencia (PDCP). La capa 3 se compone del protocolo de Control de Recursos de Radio (RRC), que forma parte del plano de control. El protocolo de capa superior (para el plano de control) es el Non Acceso Estrato (NAS), protocolo que termina en el lado del corazón de la red.

Por convención, desde el punto de vista de transmisión, a los paquetes que se entregan a un determinado nivel de la torre de protocolos se les denominan SDU (Service Data Unit) mientras que los paquetes que una capa entrega a la capa inferior del protocolo se les denominan PDU (Protocol Data Unit). Así por ejemplo, los paquetes que entrega, a través de los canales de transporte, la capa RLC hacia la capa MAC se les denominan RLC-PDU desde el punto de vista de la capa RLC y MAC-SDU desde el punto de vista de la capa MAC. En recepción el proceso es el inverso. Es decir, a los paquetes que se entregan a capas superiores se les denominan SDU, mientras que los que se reciben de capas inferiores se les denominan PDU.

Una característica importante de los SDUs y PDUs de la interfaz aire LTE es que están alineados a nivel de octeto o byte, es decir, el número de bits que componen los paquetes SDUs o PDUs siempre es múltiplo de ocho. Ello se hace así para facilitar la implementación de los protocolos y el manejo de los paquetes utilizando dispositivos micro-controladores o microprocesadores.

2.3.1 CANALES

En cuanto a los requisitos, la E-UTRAN deberá ser capaz de transmitir en alta velocidad y baja latencia la información de la manera más eficiente. Sin embargo, no todos los flujos de información requieren la misma protección contra errores de transmisión o el manejo de calidad de servicio. En general, es muy importante, especialmente en el caso de la movilidad de radio, que los mensajes de señalización E-UTRAN se transmitan lo más rápido posible, con el mejor esquema de protección de errores. Por otro lado, en aplicaciones streaming de voz o datos de aplicaciones se puede aceptar pérdidas razonables de frame debido a la radio transmisión. Con el fin de ser flexible y permitir diferentes esquemas para la transmisión de datos, las especificaciones de E-UTRAN introducen varios tipos de canales.

- _ Canales lógicos.
- _ Canales de transporte.
- _ Canales físicos.

La interrelación entre los diferentes protocolos se hace a partir de estos canales. Los

canales lógicos se establecen entre la capa RLC y la MAC, se utilizan para describir el tipo de información de usuario y/o señalización que se transmite a través de la interfaz aire. Los canales de transporte se establecen entre la capa MAC y la capa física y básicamente aportan flexibilidad a la interfaz aire, ya que permiten multiplexar diferentes canales lógicos en un canal de transporte. Además, los canales de transporte también se utilizan para describir cómo y con qué características se transmite la información a través de la interfaz aire.

Finalmente, los denominados canales físicos describen los mecanismos físicos de transmisión/recepción, a través del enlace de radio, tanto de la información de usuario como de la propia señalización del sistema.

A. CANALES LÓGICOS

Los canales lógicos se utilizan para describir el tipo de información que se transmite a través de la interfaz aire, establecidos entre el RLC y MAC. Los canales lógicos se clasifican en:

- _ Canales lógicos de tráfico, para la transferencia de información del plano usuario.
- _ Canales lógicos de control, para la transferencia de información en el plano de control.

Cada uno de los canales de estas dos categorías corresponde a un cierto tipo de flujo de información.

➤ Canales lógicos de tráfico:

- DTCH (Dedicated Traffic Channel), es un canal punto a punto destinado a transferir información entre la red (eNB) y un terminal móvil determinado. Puede ser utilizado para transferir información de usuario así como señalización a nivel de aplicación asociada a un flujo de datos de usuario. Este canal lógico existe en ambas direcciones, es decir, tanto en el enlace descendente como ascendente.
- MTCH (Multicast Traffic Channel), es un canal de datos punto-multipunto utilizado para la transmisión de flujo de datos desde la red (eNB) a uno o varios terminales. Este canal se asocia al servicio MBMS (Multimedia Broadcast y Multicast Service). Este canal lógico sólo existe en el enlace descendente.

➤ Canales lógicos de control:

- Broadcast Control Channel (BCCH), este canal es utilizado por la red (eNB) para difundir la información sobre el sistema a los terminales móviles bajo su área de cobertura (por ejemplo, la identificación del operador y la celda, configuración de los canales comunes de control o como acceder al sistema). Este canal sólo existe en el enlace

descendente.

- **Paging Control Channel (PCCH)**, este es un canal que utiliza la red (eNB) para llamar a terminales móviles de los que se conoce cuál es su área de localización pero no la celda o eNB en la que están ubicados. Esto permite notificar a los UEs de una llamada entrante o indicar cambios en la información del sistema. Este canal sólo existe en el enlace descendente.
- **Common Control Channel (CCCH)**, este canal permite la comunicación entre el eNB y el terminal móvil cuando todavía no se ha establecido una conexión a nivel de RRC. Se utiliza para enviar información de control fundamentalmente en las fases iniciales del establecimiento de la conexión. Este canal existe tanto en el enlace descendente como ascendente.
- **Dedicated Control Channel (DCCH)**, este es un canal punto a punto destinado a transferir información de control entre la red (eNB) y un terminal móvil determinado, una vez que se dispone de una conexión a nivel de RRC. Este canal lógico sólo contiene información de control procedente del RRC y señalización a nivel de NAS, pero no señalización a nivel de aplicación asociada a un flujo de datos de usuario. Existe tanto en el enlace descendente como ascendente.
- **Multicast Control Channel (MCCH)**, es un canal punto-multipunto utilizado para transmitir información de control relacionada a servicios MBMS, desde la red (eNB) a un grupo de usuarios. Este canal sólo existe en el enlace descendente.

D. CANALES DE TRANSPORTE

Los canales de transporte describen cómo y con qué características son transmitidos los datos por la interfaz de radio. Por ejemplo, los canales de transporte describen cómo se protegen los datos, el tipo de codificación de canal, la protección CRC o interpolación que se utiliza, el tamaño de los paquetes de datos enviados a través de la interfaz de radio, etc. Todo este conjunto de información que se conoce como “formato de transporte”.

Estos canales son el "interfaz" entre la MAC y la capa física. La capa física tiene que ser capaz de proporcionar la asignación dinámica de recursos tanto para la tasa de variación de datos como para la división de recursos entre diferentes usuarios. Se clasifican en dos categorías: canales de transporte del enlace descendente y canales de transporte de enlace ascendente.

➤ **Enlace descendente:**

- **Broadcast Channel (BCH)**, este canal se utiliza para transmitir los parámetros

necesarios del sistema que permitan a los dispositivos acceder al sistema y para identificar la operador. Estos parámetros incluyen, por ejemplo, parámetros relacionados al acceso aleatorio que informa al dispositivo sobre cuales recursos están reservados para la operación de acceso aleatorio. Este canal de transporte está unívocamente asociado con el canal lógico BCCH. Tiene un formato fijo, y se transmite en toda el área de cobertura del eNB.

- **Downlink Shared Channel (DL-SCH)**, este canal transporta tanto información de usuario como señalización mediante una conexión punto a punto. Soporta técnicas de retransmisión basadas en HARQ, y adaptación dinámica de enlace de radio (por ejemplo, dynamic link adaptation) variando modulación y códigos. Permite que le sean asignados recursos de radio tanto de forma dinámica como semi-estática, así como la posibilidad de implementar mecanismos de recepción discontinua en el terminal móvil (DRX) para aumentar la eficiencia en potencia. En el caso del servicio MBMS, éste canal se puede configurar para la difusión en toda la celda o bien en parte de ella utilizando técnicas de conformación de haz (beamforming). Además, transporta la información del sistema que no se puede transportar a través del BCH.

- **Paging Channel (PCH)**, este canal se transmite en toda el área de cobertura de la celda. Permite llamar a los terminales móviles así como informarlos de actualizaciones realizadas en el denominado “Sistema de Información”. Permite una asignación dinámica de recursos.

- **Multicast Channel (MCH)**, Transmitido en toda el área de cobertura de la celda. En el caso del servicio MBMS, facilita el uso de una red iso-frecuencia (por ejemplo, Single Frequency Network) utilizando una trama temporal con prefijo cíclico largo y una gestión semi-estática de los recursos radio.

➤ **Enlace ascendente**

- **Uplink Shared Channel (UL-SCH)**, este canal se utiliza para transportar tanto información de usuario como de señalización. Soporta técnicas de adaptación dinámica del enlace (modulación, codificación, potencia de transmisión.) así como mecanismos de retransmisión basados en HARQ. Permite la asignación de recursos de radio tanto de forma dinámica como semi-estática. Está preparado para permitir el uso de técnicas de conformación de haz (por ejemplo, beamforming). Es el equivalente al DL-SCH pero en enlace ascendente.

- **Random Access Channel (RACH)**, este canal se utiliza para enviar peticiones de

acceso al sistema, cuando el UE no tiene una sincronización precisa en el tiempo durante el enlace ascendente. Así como para transmitir mensajes cortos de información de control. Al ser un canal compartido por los diferentes usuarios del sistema existe riesgo de colisiones.

E. CANALES FÍSICOS

Los canales físicos son la aplicación efectiva del canal de transporte en el interfaz de radio. Estos canales pueden ser clasificados según el sentido de su transmisión, es decir, enlaces descendentes y ascendentes.

➤ **Enlace descendente:**

En el enlace descendente podemos diferenciar dos tipos de canales físicos: canales físicos de tráfico y canales físicos de control.

- **Canales físicos de tráfico.** A diferencia de los sistemas de comunicaciones celulares anteriores como GSM o UMTS, el sistema LTE no contempla el uso de canales de tráfico dedicados, sino compartidos. Es decir, sólo se establecen cuando un usuario (terminal móvil) debe recibir datos destinados a él. Existe la posibilidad de establecer enlaces punto a punto (entre un terminal móvil y la red) o punto multipunto (entre la red y múltiples usuarios, es decir una conexión tipo multicast).

Los canales físicos de tráfico en enlace descendente se clasifican en:

- ❖ Physical Downlink Shared Channel (PDSCH), es el principal canal de bajada de datos en LTE. Contiene la información entregada por la capa MAC mediante el canal de transporte Downlink Shared Channel (DL-SCH). Se utiliza para transmitir datos de usuario, así como, puede transportar mensajes de aviso y aquella de radiodifusión que no sea imprescindible para que el terminal móvil se enganche a la red. No es un canal dedicado, sólo se asigna al usuario cuando éste tiene algo que recibir en el enlace descendente.

- ❖ Physical Multicast Channel (PMCH), este canal se utiliza para transportar información MBMS (Multimedia Broadcast and Multicast System) en redes iso-frecuencia (Single-Frequency Networks o SFN).

- **Canales físicos de control:** Para permitir una transmisión eficiente de los datos de los usuarios a través de la interfaz aire, también se necesitan los denominados canales físicos de control. Estos canales transportan tanto señales de control generadas a nivel de capa física como aquel tipo de mensajes de control generados en las capas superiores del sistema. Entre este tipo de canales, tenemos:

- ❖ Physical Downlink Control Channel (PDCCH), Este canal transporta un mensaje conocido como Downlink Control Information (DCI), que incluye información de

asignación de recursos para los canales de aviso (PCH) y de tráfico compartido (DL-SCH) para un UE o de un grupo de UEs. También transporta información sobre los mecanismos de retransmisión (Hybrid ARQ).

- ❖ Physical Broadcast Channel (PBCH), Este canal lleva la información básica del sistema, la denominada Master Information Block (MIB), necesaria para acceder a la red.
- ❖ Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH), este canal informa al UE del número de símbolos OFDM (normalmente de 1, 2 o 3) utilizados para la transmisión del canal PDCCH, utilizando un indicador denominado Channel Format Indicator (CFI). Se transmite en cada sub-trama, siempre en el primer símbolo.
- ❖ Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH), este canal transporta los reconocimientos (ACK/NAK) para implementar el mecanismo de HARQ en el enlace ascendente. Su función es indicar en el enlace descendente si un paquete de enlace ascendente se ha recibido correctamente.

➤ **Enlace ascendente**

Como 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 del sistema.

• **Canales físicos de tráfico**

- ❖ Physical Uplink Shared Channel (PUSCH), este canal es utilizado para enviar información de usuario y señalización de capas superiores.

• **Canales físicos de control**

- ❖ Physical Uplink Control Channel (PUCCH), este canal lleva información de control del enlace ascendente, puede transmitir informaciones de control, tales como: 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 de radio en el enlace descendente.
- ❖ Physical Random Access Channel (PRACH), este canal lleva el preámbulo de acceso aleatorio enviado por los terminales para tener acceso a la red.

F. MAPEO ENTRE CANALES FÍSICOS DE TRANSPORTE Y LÓGICOS

Por razones obvias, no todas las combinaciones están permitidas debido a que algunos de los canales lógicos tienen limitaciones específicas.

Los canales lógicos PCCH y BCCH tienen particulares características de transporte y físicas por eso que la asignación de canal de transporte y física es específica para ellos. El mapeo de la BCCH en los canales de transporte BCH y DL-SCH no es una opción. Esto viene del hecho de que el Sistema de Información se compone realmente de dos partes:

- _ Información crítica del sistema que tiene un formato fijo y frecuentes requerimientos de actualizaciones (éste se asigna en el PBCH).
- _ Dinámico y menos información crítica que se asigna en un canal de transporte ofreciendo una mayor flexibilidad en términos de período de ancho de banda y la repetición periódica (éste se asigna en el DL-SCH).

Por otra parte, algunos canales lógicos se pueden beneficiar de diferentes opciones como sea posible respecto a la asignación del canal de transporte. Normalmente, este es el caso de los canales de multidifusión MCCH y MTCH, los cuales son asignados a un específico canal de transporte MCH, en caso de la provisión de servicios multicelular MBMS. Cuando un servicio MBMS se proporciona en una sola celda, canales de MCCH y MTCH se asignan a través de canales convencionales DL-SCH.

Los otros canales físicos (como PUCCH, PDCCH, PCFICH y PHICH) no llevan información de las capas superiores (como la señalización RRC o los datos del usuario). Estos son solamente destinados para propósitos de la capa física, ya que contienen información relacionada con la codificación de bloques físicos, o información relacionada con HARQ. Esta es la razón por la que los canales no se asignan a cualquiera de los canales de transporte de la interfaz de radio. El RACH es un caso particular de canal de transporte, que no tienen equivalente en canal lógico. Esto viene del hecho de que el RACH sólo lleva preámbulo RACH (que es básicamente el primer conjunto de bits que el terminal envía a la red para solicitar el acceso). Una vez que el acceso es concedido por la red y los recursos físicos de enlace ascendente se asignan al terminal el RACH ya no es utilizado por el terminal.

➤ **Enlace descendente**

La relación entre los canales lógicos, de transporte y físicos en el caso del enlace descendente es mostrada en la Figura 2.18.

En el caso del canal lógico de radiodifusión (BCCH), y dependiendo del tipo de información a transmitir, dicho canal puede transmitirse utilizando bien el canal de transporte de radiodifusión (BCH) o bien el canal compartido (DL-SCH).

El canal de transporte de radiodifusión (BCH) sólo lleva la información del sistema mí-

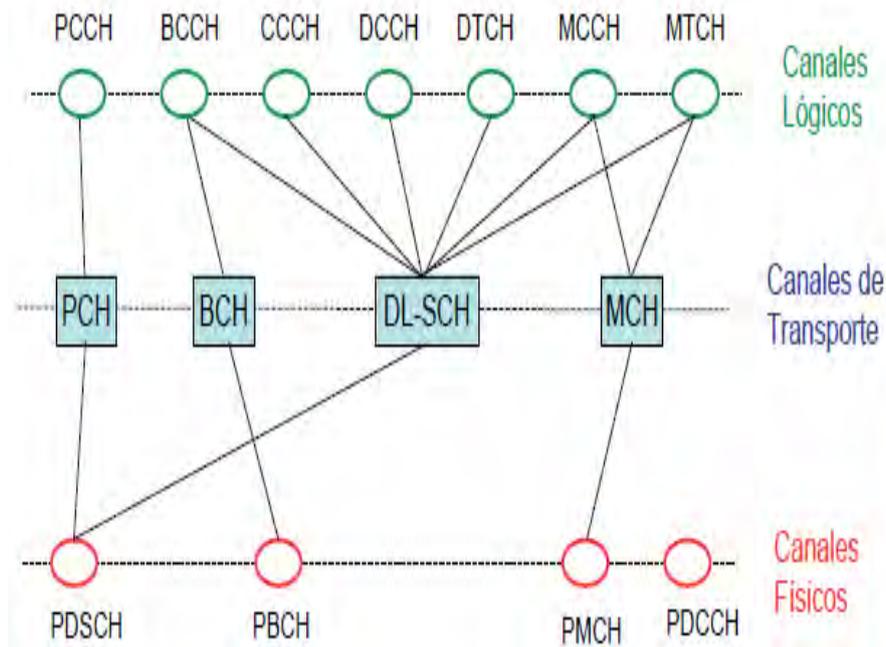


Figura 2.18 Relación entre los canales del enlace descendente [6]

nima necesaria para que el terminal móvil pueda acceder al mismo (por ejemplo, la canalización disponible en el sistema, el número de trama, o información de configuración de los canales físicos). El resto de la información sobre el sistema llega al terminal móvil mediante los denominados System Information Block (SIB) que se transmiten utilizando el canal de transporte compartido (DL-SCH).

También es importante subrayar que dicho canal de transporte compartido (DL-SCH) se utiliza no sólo para transportar datos de usuario (DTCH) sino también señalización común (CCCH) y dedicada (DCCH). Ello es así, ya que a diferencia de los sistemas de comunicaciones móviles previos, el sistema LTE no define canales físicos ni de transporte dedicados. En otras palabras, sólo cuando el usuario tiene datos o señalización a recibir o bien la red necesita enviar información de control común, se activa el canal compartido y por lo tanto no se desperdician recursos manteniendo activos canales dedicados que no siempre se utilizan.

Por lo que respecta a la transmisión de la información y/o señalización multicast (canales lógicos MTCH/MCCH), si bien en el caso de transmisión de este tipo de servicio en una única celda cabe utilizar también el canal de transporte compartido (DL-SCH), generalmente se utiliza un canal de transporte específico para este tipo de información (MCH) ya que habitualmente este tipo de servicio se implementa utilizando redes iso-frecuencia y por lo tanto disponer de un canal específico para dicho fin facilita el

despliegue y gestión de este tipo de redes.

En términos de canales físicos, es decir aquellos que implementan los mecanismos de transmisión a través del medio radioeléctrico, el sistema LTE es muy simple, ya que existe una relación directa entre el canal de transporte de radiodifusión (BCH) y su correspondiente canal físico (PBCH) o entre el canal de transporte multicast (MCH) y su correspondiente canal físico (PMCH). También existe una relación directa entre el canal de transporte compartido (DL-SCH) y su correspondiente canal físico (PDSCH), si bien este último también puede llevar el canal de transporte de aviso o paging (PCH). Puesto que el canal físico compartido (PDSCH) puede llevar muchos tipos de información y por lo tanto tener formatos diferentes, es necesario definir a nivel de capa física un canal de control (PDCCH) que lleve la señalización necesaria para procesar (modular, demodular y ubicar en la estructura frecuencia-tiempo propia de la señal OFDMA) el mencionado canal PDSCH. Obviamente, este canal PDCCH no tiene ninguna relación ni con los canales de transporte ni los canales lógicos, ya que sólo transmite señalización de capa física.

➤ **Enlace ascendente**

La relación entre los canales lógicos, de transporte y físicos del enlace ascendente es mostrada en la Figura 2.19. Para este enlace la interrelación es bastante más simple, por cuanto a nivel de canales lógicos sólo están definidos los canales de tráfico (DTCH), de control dedicado (DCCH) y de control común (CCCH) que, de forma análoga al enlace descendente, también se transportan utilizando un canal de transporte compartido, denominado ahora UL-SCH. Como en el caso del enlace descendente también ahora hay una relación unívoca entre dicho canal de transporte compartido y su correspondiente canal físico (PUSCH). Análogamente también se necesita definir un canal de control (PUCCH) a nivel de capa física que lleve la señalización necesaria para procesar (modular, demodular y ubicar en la estructura frecuencia-tiempo) la señal SC-FDMA que se utiliza en el mencionado canal PUSCH. Obviamente, tampoco este canal de control PUCCH no tiene ninguna relación ni con los canales de transporte ni los canales lógicos, ya que sólo lleva señalización de capa física.

Por lo que respecta al canal de acceso aleatorio sólo están definidos los canales físico (PRACH) y de transporte (RACH) que están relacionados de manera unívoca. No se precisa interacción a nivel de canal lógico ya que básicamente el canal de acceso es una secuencia preámbulo que sirve para informar al eNB de que un terminal móvil quiere conectarse al mismo. El resto de la señalización necesaria en el proceso de acceso

aleatorio, por ejemplo la petición de conexión a nivel RRC (RRC Connection Request), actualización del área de localización (Tracking area update) o petición de asignación de recursos (Scheduling Request) puede ya transmitirse utilizando el canal compartido (UL-SCH) y por lo tanto, no es necesario establecer ningún otro canal lógico que realice la misma funcionalidad.

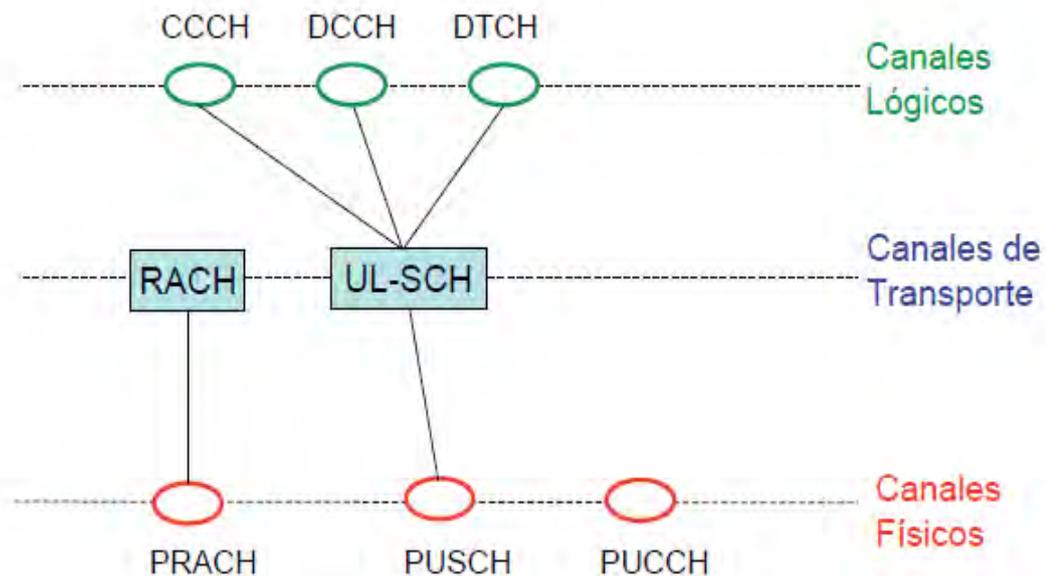


Figura 2.19 Relación entre los canales del enlace ascendente [6]

2.3.2 RADIO RESOURCE CONTROL

El protocolo de Control de Recursos de Radio (Radio Resource Control o RRC), es el encargado de controlar el comportamiento del móvil cuando éste está en el modo de operación “estado conectado”, mientras que especifica la señalización de aviso (paging) y del Sistema de Información cuando el sistema todavía no tiene establecidos los servicios portadores de radio (por ejemplo, terminal en modo Idle). Las principales funciones del protocolo RRC son:

- _ Radiodifusión de la información generada en el denominado Sistema de Información, que incluye la difusión de información común (destinada a todos los terminales móviles) procedente de capas superiores (NAS), información aplicable cuando el terminal móvil está en modo Idle (por ejemplo: parámetros para la re-selección de celda, información sobre celdas vecinas, etc.).
- _ Control de conexión RRC, que implica a todos los procedimientos relacionados con el establecimiento, mantenimiento y cierre de una conexión RRC, incluyendo los

mecanismos de aviso, establecimiento de las portadoras de radio de señalización (SRB) y de las portadoras de radio de datos de usuario (Data Radio Bearers o DRB), establecimiento inicial de los mecanismos de seguridad, integridad y cifrado, configuración de las capas inferiores (PDCP, RLC, MAC, física), etc.

- _ Gestión de movilidad entre tecnologías de acceso controladas por la red, incluyendo los procedimientos de movilidad, seguridad y transferencia de la información de contexto por parte del terminal móvil.

- _ Gestión de los mecanismos de configuración de medidas y de transferencia de información en el caso de movilidad tanto entre tecnologías de radio como inter-frecuencias e intra-frecuencias.

2.3.3 PACKET DATE CONVERGENCE PROTOCOL

Este protocolo ubicado por encima de la capa RLC es aplicado a los datos del plano de usuario pero también es utilizado para la mayoría de los mensajes de la RRC transmitidos por el plano de control. En algunos planes iniciales de la arquitectura LTE, PCDP estaba en el otro lado de la interfaz S1 (en el núcleo de la red), pero después fue puesto adelante del eNB junto con todos otros protocolos de radio. Las funcionalidades clave de la PCDP son:

- _ Compresión y descompresión de la cabecera de los paquetes IP. Esto se basa en el protocolo Robust Header Compression (ROHC), especificado por el IETF. Mediante ésta compresión el tamaño de la cabecera se reduce de los 40 octetos típicos de una cabecera UDP/TCP-IP a un tamaño medio de cabecera entre 1 y 3 octetos.

- _ Cifrar y descifrar en el plano del usuario y la mayoría de los datos del plano de control, utilizando para ello una clave de 128 bits.

- _ Implementa mecanismos de protección de la integridad de los mensajes de señalización generados tanto por la capa RRC como por los protocolos de la parte de NAS ubicados en la entidad de gestión de la movilidad, lo cual garantiza que los datos provienen de una fuente confiable.

- _ Funcionalidades adicionales de capa 2 tales como reordenación y/o detección de duplicidades de paquetes RLC cuando se implementan mecanismos de movilidad entre eNBs.

- _ Deseche los datos del plano del usuario debido a tiempo de espera.

En la Figura 2.20 se muestra el modelo de la capa PDCP, tanto en el plano de usuario como el plano de control.

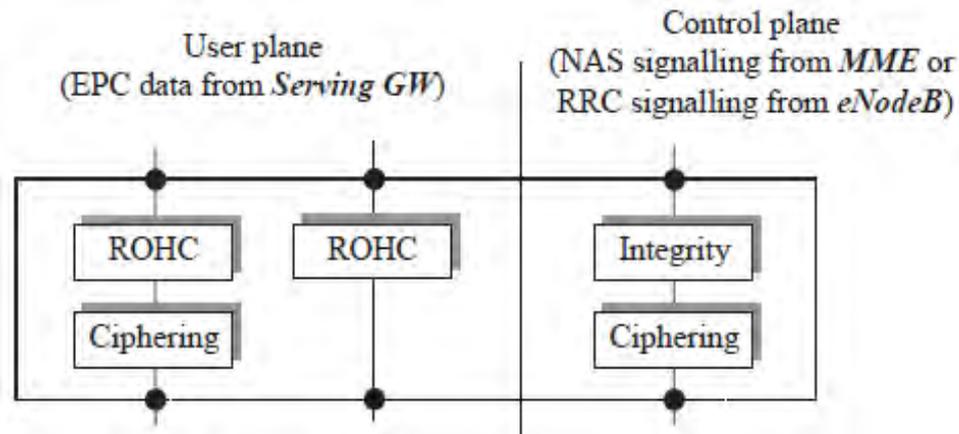


Figura 2.20 Modelo de capa PDCP [11]

Es importante subrayar que los mecanismos de cifrado y protección de la integridad son obligatorios en los flujos de señalización que se transmiten a través del plano de control de la interfaz aire LTE, mientras que el cifrado es opcional en los flujos de datos transmitidos a través del plano de usuario de dicha interfaz aire.

Por lo que respecta al mecanismo de compresión de cabeceras, si bien teóricamente es obligatorio en todos los casos, hay que mencionar que el protocolo ROHC soporta un modo de operación “transparent uncompress mode” que permite mantener la cabecera del paquete IP inalterada. La arquitectura de la capa de PDCP del plano usuario difiere del plano de control, como se muestra en las Figuras 2.21 y 2.22, respectivamente.

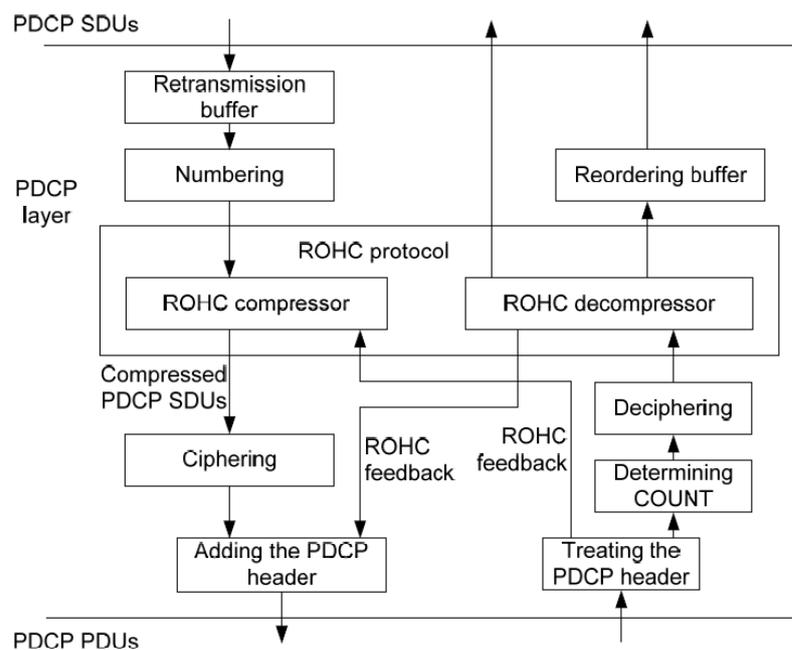


Figura 2.21 Resumen de PDCP según el plano de usuario [5]

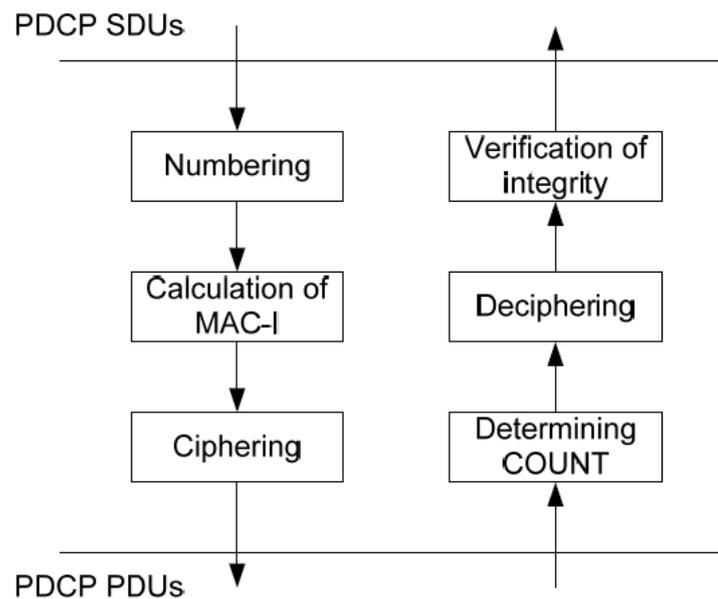


Figura 2.22 Resumen de PDCP según el plano de control [5]

Dos tipos diferentes de PDUs PDCP se definen en LTE: PDU de datos PDCP y PDU de control PDCP. PDUs de datos se utilizan para el plano de control y el plano de datos. PDUs de control PDCP sólo se utilizan para transportar la información de retroalimentación para la compresión de cabecera y para reportar la situación del PDCP los cuales son usados en caso de handover (sólo se utilizan dentro del plano de usuario).

A. FORMATO DEL PDU

Los PDUs PDCP para datos del plano de usuario comprenden un campo “D / C” a fin de distinguir los PDUs de datos de los PDUs de control. Los PDUs de datos PDCP comprende entre 7 a 12 bits de SN (Sequence Number). Esto es mostrado en la Figura 2.23. Los PDUs de datos PDCP para los datos del plano de usuario contienen un paquete IP sin comprimir (si la compresión de cabecera no se usa) o uno comprimido.



Figura 2.23 Formato de los datos PDU en el plano usuario PDCP [5]

Los PDUs de datos PDCP para los datos de plano de control (por ejemplo, la señalización RRC) comprenden un campo MAC-I de 32 bits longitud para la protección de la integridad. Estos PDUs además contienen un campo para un mensaje RRC completo.

Hay tres tipos de PDUs de datos PCDP que se distingue principalmente por la longitud de la SN y la presencia del campo MAC-I. La longitud de la SN en relación con la velocidad de datos y el tamaño del paquete determinan el máximo tiempo de interrupción posible sin perder el sincronismo del valor de contador que se utiliza para el cifrado y protección de la integridad (ver Tabla 2.3).

PDU type	D/C field	Sequence Number length	MAC-I	Applicable RLC Modes
User plane long SN	Present	12 bits	Absent	AM / UM
User plane short SN	Present	7 bits	Absent	UM
Control plane	Absent	5 bits	32 bits	AM / UM

Tabla 2.3 Formatos de los datos PDUs en PDCP [5]

El PDU de dato PDCP para los datos de plano de usuario usa largos SN para tener mayores tiempos de interrupción, y hace que esto sea posible, cuando se asigna el Modo Reconocido RLC, pero implica una cabecera más grande. Por lo tanto, se utiliza principalmente para aplicaciones de datos con un gran tamaño de paquete IP donde la sobrecarga en comparación con el tamaño del paquete no es muy significativa, por ejemplo, para la transferencia de archivos, navegación web o el tráfico de e-mail.

El PDU de datos PDCP para los datos del plano de usuario usa los SN cortos asignados en el Modo no Reconocido RLC para ser usados en servicios de VoIP, donde se aplica el traspaso sin pérdidas y la retransmisión no es necesaria.

Los PDUs de control PDCP son utilizados por las entidades PDCP para el manejo de datos del plano de usuario. Hay dos tipos de PDUs de control PDCP, los cuales se distinguen por campo el campo "PDU type" en el encabezado PDCP. Los PDUs de control PDCP llevan o realizan informes de estado PDCP para el caso de traspaso sin pérdidas o realimentación ROHC creado por el protocolo de compresión de cabecera ROHC. La Figura 2.24 muestra el formado descrito.

D/C	PDU Type	Interspersed ROHC feedback / PDCP status report
-----	----------	---

Figura 2.24 Formato de los datos PDUs en el plano de control PDCP [5]

Con el fin de reducir la complejidad, un PDU de control PDCP lleva realimentación

ROHC exactamente en un paquete de realimentación ROHC (no hay posibilidad de transmitir varios paquetes realimentación ROHC en un PDCP PDU).

Un PDU de control PDCP llevando un reporte de estado PDCP para el caso de traspaso sin pérdida se utiliza con el fin de impedir la retransmisión de los SDUs PDCP recibidos correctamente y también para solicitar la retransmisión de SDUs PDCP que se han recibido correctamente, pero la descompresión de la cabecera falló. Este PDU de control PDCP contiene un mapa de bits que indica que los SDUs PDCP deben ser retransmitidos y un número de secuencia de referencia, la primera falla SDU (First Missing SDU: FMS). En el caso de que todas las SDUs PDCP se han recibido en la secuencia este campo indica el siguiente número de secuencia esperado, y no se incluye el mapa de bits.

2.3.4 RADIO LINK CONTROL

La capa RLC se encuentra entre la capa de PDCP (capa superior) y la capa MAC (capa inferior). Esta capa es la responsable de una transmisión fiable de la información a través de la interfaz de aire. Tiene las siguientes funcionalidades básicas:

- _ Realiza procedimientos de segmentación y/o concatenación de los paquetes IP recibidos de capas superiores (también denominados SDU RLC) para adaptar su tamaño a lo indicado por la capa MAC. A los paquetes creados se les denomina PDUs RLC.
- _ Implementa mecanismos de retransmisión de los PDUs RLC recibidos erróneamente debido a operación HARQ de la capa MAC, así como evitar duplicidades y gestiona que los paquetes SDU RLC recibidos se entreguen ordenados a las capas superiores.

En UMTS el reordenamiento HARQ se realiza en la capa MAC a diferencia de LTE que lo realiza en la RLC. Esto representa una ventaja para LTE debido a que este reordenamiento no adiciona SN.

Las funciones de la capa RLC son realizadas por entidades RLC. Una entidad RLC se configura en uno de los tres modos de transmisión de datos: Modo Transparente (TM), Modo no Reconocido (UM), y Modo Reconocido (AM)

- **Modo Transparente (Transparent Mode o TM)**, es el modo de operación más simple ya que entrega directamente a la capa MAC los SDUs RLC recibidos de las capas superiores sin añadir ninguna cabecera a nivel de capa RLC, ni existen mecanismos de segmentación y/o concatenación, ni de retransmisión. Es decir, actúa de manera transparente ante la información que pasa por él. Por lo tanto, el uso de este modo es muy restringido, siendo únicamente apropiado para los servicios que no utilizan las retransmisiones de la capa física o que no son sensibles al orden de entrega. Así, solo los

canales lógicos BCCH, CCCH PCCH pueden funcionar en este modo. TM RLC proporciona un servicio de transferencia de datos unidireccional, en otras palabras, este modo es configurado en transmisión o en recepción pero no ambos a la vez. Además, este modo no es usado para la transmisión de datos en el plano usuario.

- **Modo de No-reconocimiento (Unacknowledged Mode o UM)**, este modo de operación detecta si los paquetes SDUs RLC recibidos contienen errores, pero no implementa mecanismos de retransmisión. También realiza funciones de segmentación y re ensamblado así como gestiona la reordenación, si es necesario, de los SDUs RLC recibidos. Para ello utiliza un campo de la cabecera RLC denominado número de secuencia (Sequence Number). Este modo de operación fundamentalmente aplica a los canales de tráfico (TCH) y a canales multicast (MTCH), dependiendo del tipo de aplicación y de la calidad de servicio requerida (QoS). Principalmente, utilizado por aplicaciones en tiempo real sensibles al retardo y tolerante a errores, especialmente de VoIP y otros servicios de streaming sensibles al retardo. Servicios punto-multipunto tales como MBMS (Multimedia Broadcast / Multicast Service) también utilizan UM.

- **Modo de Reconocimiento (Acknowledged Mode o AM)**, es el modo de operación más robusto. Además de las funciones de segmentación/re ensamblado y de ordenación de los SDUs RLC también proporciona mecanismos de retransmisión tipo ARQ para eliminar posibles errores introducidos por el canal de radio. Este modo de operación típicamente aplica a los canales dedicados tanto de tráfico (DTCH), dependiendo de la calidad de servicio requerida (QoS), como de control (DCCH). Existe un mapeo directo entre los flujos de información y/o control recibidos por la subcapa RLC y los canales lógicos definidos entre las capas RLC y MAC.

2.3.5 MEDIUM ACCESS CONTROL

El control de acceso medio (MAC) protocolo de radio de E-UTRAN tiene como propósito principal proporcionar un acoplamiento eficiente entre la capa RLC y la capa física, mediante canales lógicos y canales de transporte respectivamente. Desde esa perspectiva, el MAC cumple con siguientes funciones:

- _ Mecanismos de corrección de errores mediante procedimientos de retransmisión (Hybrid ARQ o HARQ). Este es un mecanismo de retransmisión, distinto del situado en la capa RLC, que se aplica ahora sobre los canales de transporte.

- _ Gestión de prioridades entre canales lógicos de un mismo terminal móvil, así como, entre terminales móviles utilizando técnicas de gestión dinámica de recursos (Dynamic

Scheduling).

- _ Selección del formato de transmisión (tipo de modulación, tamaño del bloque de transporte, etc.) a utilizar por parte de la capa física.

- _ Multiplexado/demultiplexado de paquetes MAC (MAC SDUs) pertenecientes a diferentes canales lógicos en los denominados bloques de transporte (Transport Blocks o TB) para ser entregados/recibidos a/de los canales físicos utilizando para ello los denominados canales de transporte. En el caso que existan diferentes posibilidades de mapeo entre los canales de transporte y los canales físicos, la sub-capa MAC selecciona la configuración más apropiada, tomando en consideración las posibles configuraciones definidas por el operador.

- _ Informar sobre la gestión de los recursos de radio. De forma general, el sistema LTE gestiona los recursos de dos formas: gestión dinámica y gestión semi-estática o persistente. En el caso de gestión dinámica de recursos, utiliza el enlace descendente (eNB hacia móvil) para enviar mensajes de asignación de recursos y el enlace ascendente (móvil hacia eNB) para confirmar dicha asignación, subtrama a subtrama. En el caso de asignación semi-estática el procedimiento es similar, sólo que los recursos asignados en el enlace ascendente lo son por un periodo de tiempo mayor que una subtrama. En ambos casos el móvil envía al eNB los denominados Buffer Status Reports que informan del número de bytes almacenados en las colas (buffer) del móvil todavía pendientes de transmitir. A partir de esta información el eNB puede realizar la asignación de recursos más apropiada, tanto en el enlace ascendente como descendente, en función de los requisitos de calidad de servicio asociados a cada flujo de información o servicio establecido.

2.4 CAPA FÍSICA

La capa física ofrece servicios de transporte de datos a las capas superiores. El acceso a estos servicios es a través de la utilización de un canal de transporte a través de la sub-capa de MAC. Esta capa cumple con las siguientes funciones con el fin de prestar el servicio de transporte de datos:

- _ Detección de errores en el canal de transporte y la indicación a las capas superiores.
- _ Codificación y decodificación FEC de los canales de transporte.
- _ Nivel de concordancia en la codificación de canales de transporte a los canales físicos.
- _ Mapeo de los de canales de transporte codificados en canales físicos.
- _ Modulación y demodulación de los canales físicos
- _ Sincronización en tiempo y frecuencia.

- _ Medición de las características de radio e indicación a las capas superiores.
- _ Diversidad de transmisión.

El esquema de acceso al medio está basado en OFDMA para el enlace descendente y SC-FDMA para el enlace ascendente. Para apoyar la transmisión en el espectro de pareados y no pareados, dos modos dúplex son soportados: FDD, trabajando en full y half dúplex, y TDD.

La capa física de un sistema de acceso de radio tiene un papel clave en la definición de la capacidad resultante y se convierte en un punto central al comparar los diferentes sistemas para el desempeño esperado. Por supuesto, un sistema competitivo requiere de una capa física eficiente para garantizar un buen rendimiento tanto a través de la capa de aplicación y el usuario final.

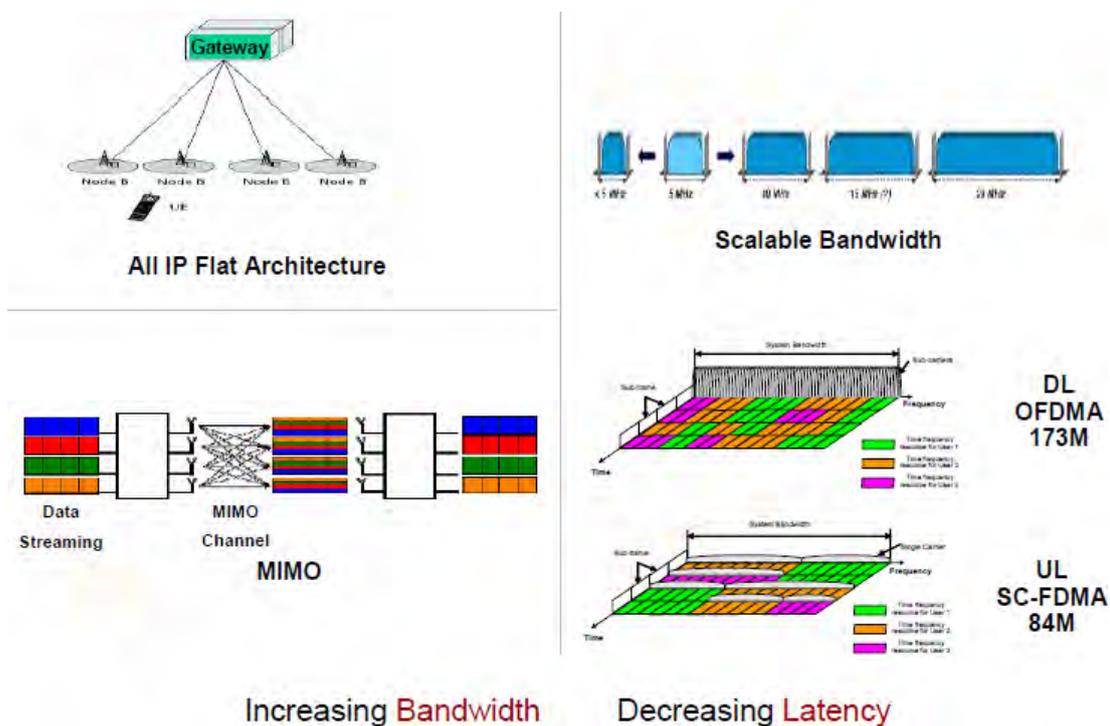


Figura 2.25 Factores claves de LTE (Fuente: Huawei)

La capa física en LTE está basada en la utilización de técnicas de acceso múltiple OFDMA y SC-FDMA, para el enlace descendente y ascendente respectivamente. Estas dos técnicas junta al uso de sistemas MIMO, escalabilidad del ancho de banda, y una red full IP son consideradas los puntos clave del éxito de LTE. En la Figura 2.25 se muestran las principales características de la capa física.

Tanto en OFDMA y SC.FDMA se usa separación fija entre sub-portadoras igual a 15

KHz. La cantidad de sub-portadoras disponibles está en función de la canalización del sistema, tal como se indica en la Tabla 2.4.

Canalización	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Tamaño FFT	128	256	512	1024	1536	2048
Número de subportadoras disponibles	73	181	301	601	901	1201

Tabla 2.4 Canalización del sistema LTE [6]

Como se observa en la Tabla 2.4, en LTE se puede trabajar con el BW_{canal} . Pero se debe tener en consideración que para cálculos de ingeniería se trabaja con un BW_{config} , los cuales representan un porcentaje del ancho de banda de canal. Esto se observa en la Figura 2.26.

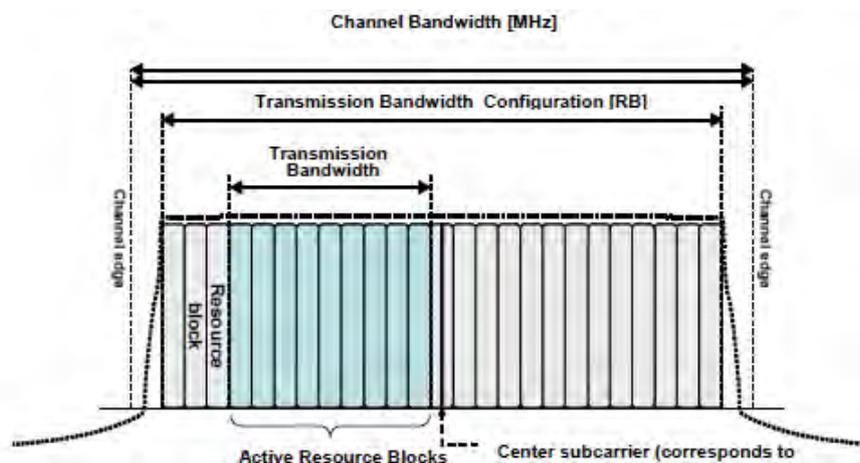


Figura 2.26 Definición del ancho de banda y la configuración del ancho de banda de transmisión para una portadora LTE [13]

En la Tabla 2.5 se detalla las equivalencias entre BW_{canal} y BW_{config} .

Channel bandwidth $BW_{channel}$ [MHz]	Transmission bandwidth configuration N_{RB}	Transmission bandwidth configuration BW_{config} [MHz]
1.4	6	1.08
3	15	2.7
5	25	4.5
10	50	9
15	75	13.5
20	100	18.0

Tabla 2.5 Configuración de los anchos de banda de transmisión en los anchos de banda en LTE [10]

Las modulaciones con las que se puede trabajar para el enlace descendente son: QPSK, 16 QAM y 64 QAM, mientras que para el enlace ascendente solo se puede trabajar con QPSK y 16 QAM (el uso de 64 QAM depende de la categoría del UE). Esto se muestra en la Tabla 2.6.

	Category 1	Category 2	Category 3	Category 4	Category 5
Peak rate DL/UL	10/5 Mbps	50/25 Mbps	100/50 Mbps	150/50 Mbps	300/75 Mbps
Modulation DL	QPSK/16QAM/64QAM				
Modulation UL	QPSK/16QAM	QPSK/16QAM	QPSK/16QAM	QPSK/16QAM	QPSK/16QAM + 64QAM
MIMO DL	Optional	2 × 2	2 × 2	2 × 2	4 × 4

Tabla 2.6 Modulación para el enlace descendente y ascendente [9]

2.4.1 BLOQUE DE RECURSOS FÍSICOS (PRB)

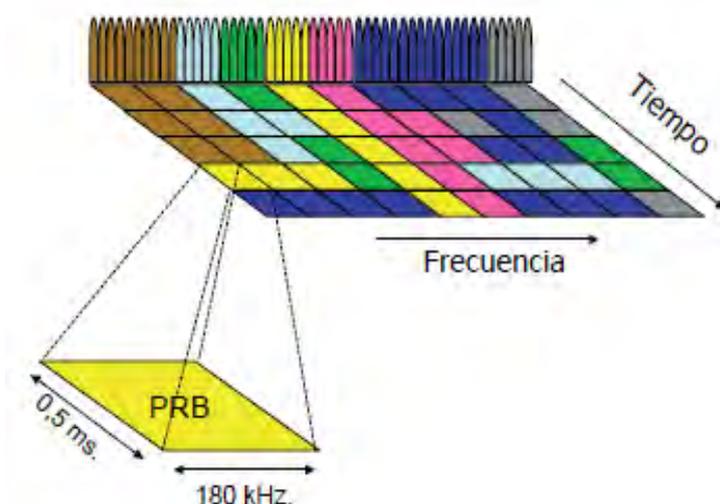


Figura 2.27 Concepto de PRB [10]

Un concepto muy importante es del PRB (Physical Resource Block), el cual es el mínimo elemento de información. El PRB es una estructura de matriz tiempo – frecuencia la cual ocupa 180 KHz de banda equivalente a doce sub-portadoras equiespaciadas 15KHz entre ellas y en tiempo tiene una duración de 0,5 ms denominado time slot (TS). En la Figura 2.27 se puede apreciar la unidad básica de recursos en LTE.

El número de bloques de recursos físicos disponible en el sistema depende de la canalización, tal como se indica en la Tabla 2.7.

Channel bandwidth BW_{Channel} [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
Transmission bandwidth configuration N_{RB}	6	15	25	50	75	100

Tabla 2.7 Número de PRBs en función de la canalización [13]

Existe una relación entre el número de portadoras del enlace de bajada y PRBs. El número de portadoras es 12 veces el número de PRBs más uno (la portadora central, o subportadora DC, la cual no se utiliza para la transmisión de datos), tal como se muestra en la Figura 2.28.

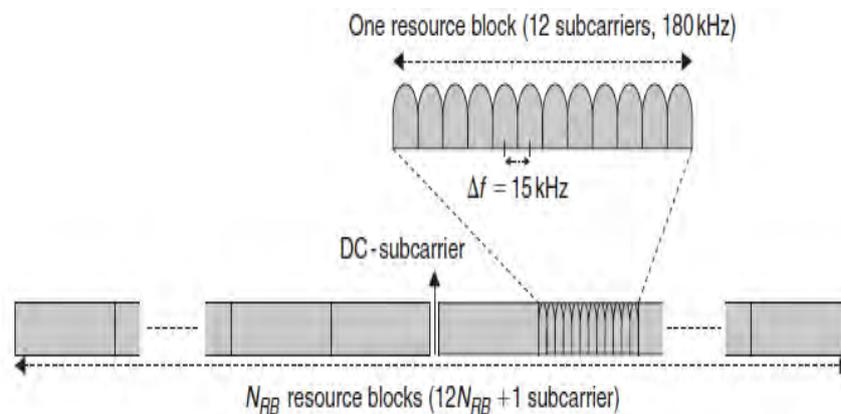


Figura 2.28 Estructura del dominio de frecuencia en el enlace de bajada [10]

En el dominio del tiempo cada slot puede estar formado por 3, 6 o 7 símbolos. La cantidad de símbolos depende del tipo de prefijo cíclico que se esté usando. El prefijo cíclico normal nos permite trabajar con 7 símbolos mientras que el prefijo cíclico extendido solo permite trabajar con 6 símbolos (el uso del tipo de prefijo depende del diseño). Esto se detallada en la Figura 2.29

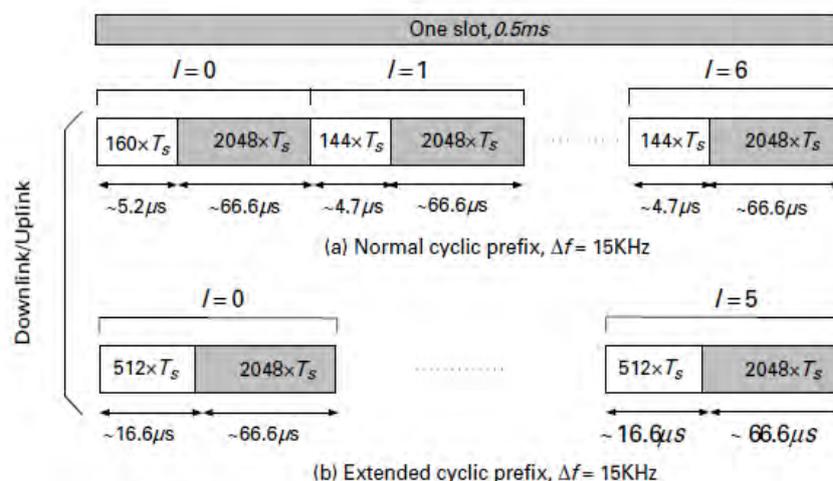


Figura 2.29 Estructura del slot según el prefijo cíclico [14]

Además, el PRB está constituido por los denominados RE (Resource Element). El RE está formado en el dominio de frecuencia por 15 KHz y en dominio de tiempo por un símbolo, tal como se observa en la Figura 2.30.

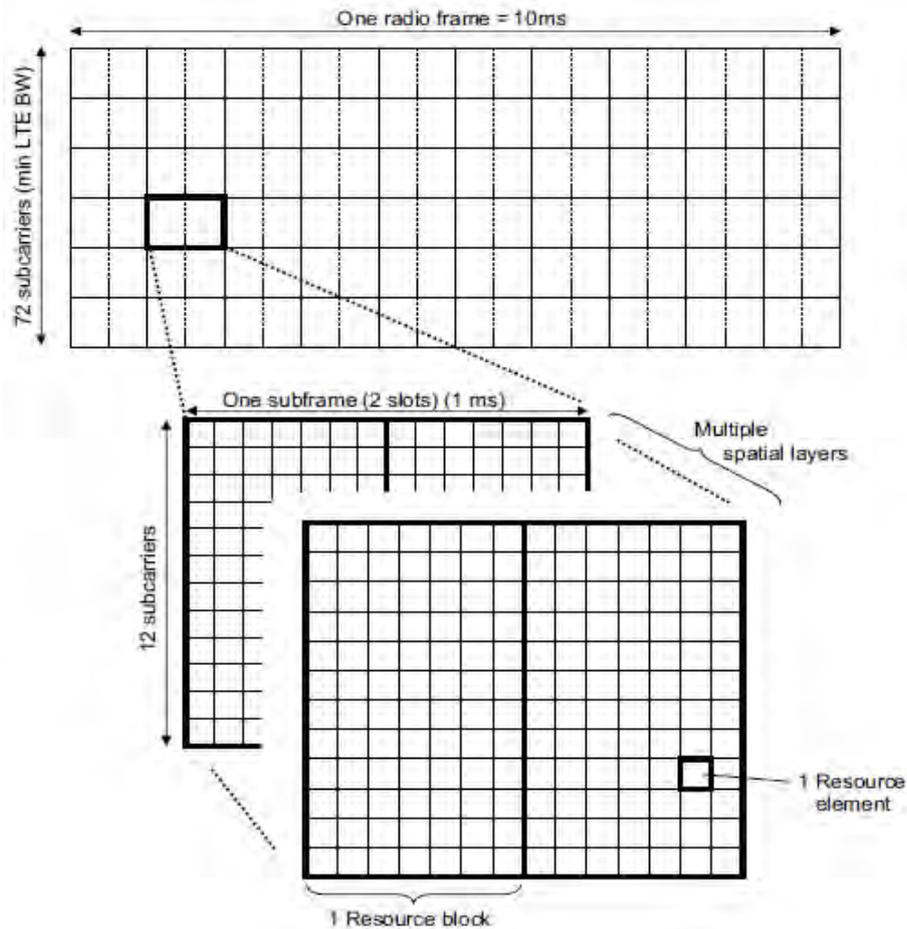


Figura 2.30 Estructura básica de recursos tiempo frecuencia en LTE [5]

La capacidad depende directamente de la cantidad de REs asignados al canal de tráfico, la cantidad de bits (relacionada al tipo de modulación).

2.4.2 ESTRUCTURA DE LA TRAMA

En el dominio del tiempo existen dos posibilidades para la estructura de la trama, la cual depende del tipo de duplexación a usar. En esta tesis solo mencionaremos al Tipo 1.

A. Tipo 1

Usada para la duplexación FDD y válida para el enlace descendente y ascendente. El eje temporal está dividido en tramas de 10 ms. Cada trama está sub-divida en 10 sub-tramas de 1 ms las cuales también son están formadas por 2 ranuras temporales (slots o TS) de 0.5 ms de duración. Esto se muestra en la Figura 2.31.

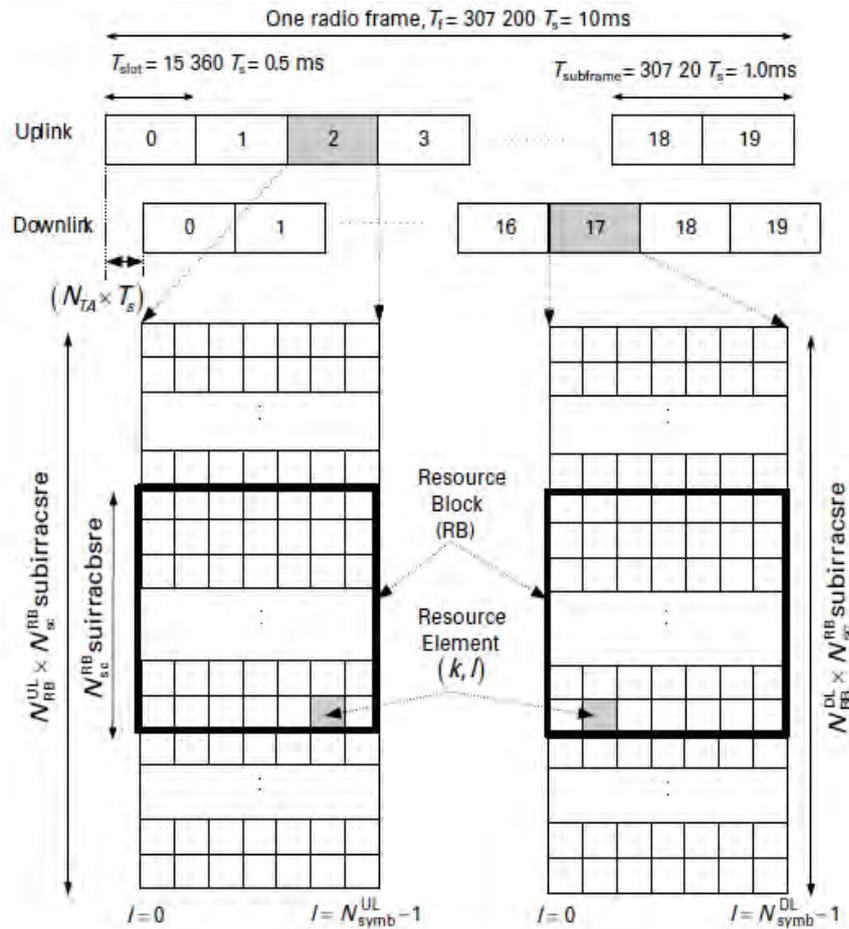


Figura 2.31 Estructura de la trama para multiplexación FDD [14]

2.4.3 SEÑALES DEL ENLACE DESCENDENTE

A. SEÑALES FÍSICAS

Tienen la finalidad la facilitar los mecanismos para realizar la demodulación/detección de señales moduladas en OFDMA. Entre estas señales tenemos:

- **Señales de referencia (RS):** Estas señales sirven para:
 - Obtener medidas de calidad del enlace.
 - Estimar la respuesta impulsional del canal para la demodulación/detección coherente.
 - Implementar mecanismos de búsqueda de la celda y sincronización inicial.
 - Estas señales se ubican en determinados RE (una portadora y un símbolo). Existen señales de referencias primarias y secundarias. En la Figura 2.32 y 2.33 se muestra la ubicación dentro de la matriz de recursos de estas señales.
- **Señales de sincronismo (SCH):** Se utilizan para facilitar el proceso de sincronización temporal del sistema. Al igual que las señales de referencia, esta posee dos tipos de señales: primarias y secundarias. Las señales primarias permiten la sincronización a nivel

de subtrama mientras que la secundaria permite la sincronización a nivel de trama.

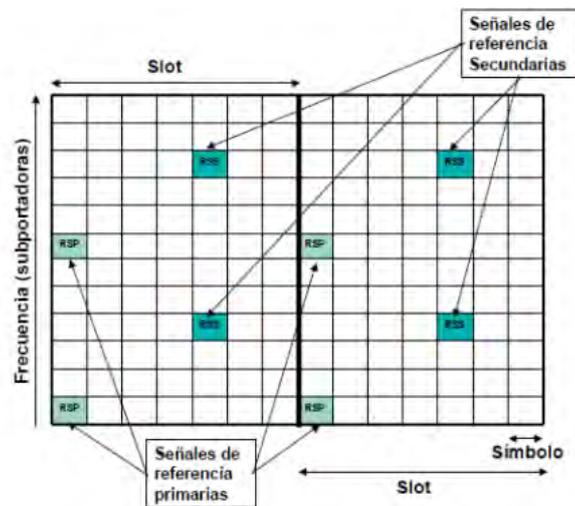


Figura 2.32 Ubicación de señales de referencia para el caso de una antena [6]

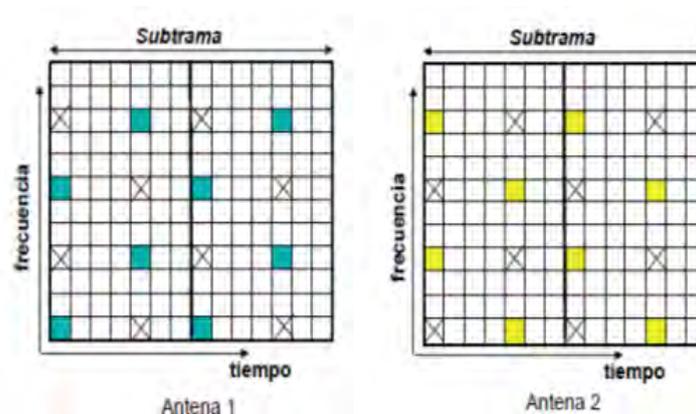


Figura 2.33 Ubicación de señales de referencia para el caso de dos antenas [6]

B. CANALES

Estos canales se clasifican en canales físicos de tráfico y canales físicos de control.

➤ Canales físicos de tráfico

- PDSCH (Physical Downlink Shared Channel): Transmite información del usuario, de control tanto dedicada como común (por ejemplo paging y ciertos parámetros de radiodifusión).
- PMCH (Physical Multicast Channel): Se utiliza para transportar información MBMS destinada a los usuarios unicast en redes isofrecuencia.

➤ Canales físicos de control

- PBCH (Physical Broadcast Channel): Transporta información de radiodifusión básica

de la red que permite la conexión inicial de un terminal móvil a la red.

- PDCCH (Physical Downlink Control Channel): Informa sobre los recursos en el enlace asignados al PDSCH.
- PCFICH (Physical Control Format Indicator Channel): Informa al UE sobre el número de símbolos (1, 2 ó 3) utilizados para transmitir el PDCCH.
- PHICH (Physical Hybrid ARQ Indicator Channel): Transporta información de reconocimiento (ACK/NACK) correspondiente a las transmisiones del enlace ascendente.

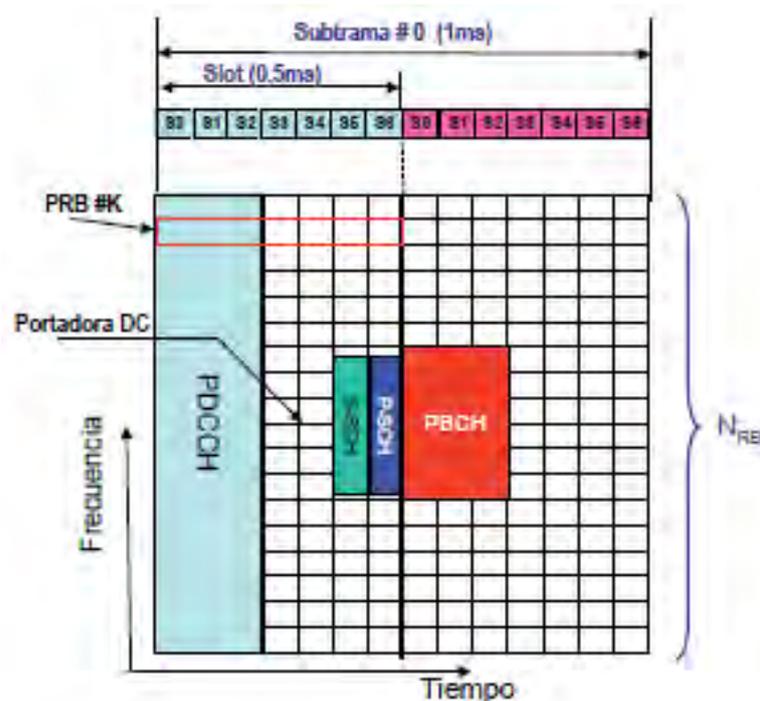


Figura 2.31 Ubicación en el RB de los canales comunes de control y señales de referencia

[6]

2.4.4 SEÑALES DEL ENLACE ASCENDENTE

A. SEÑALES DE REFERENCIA

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

- Señales utilizadas en la estimación de la respuesta al impulso del canal, denominadas DeModulation Reference Signal o DM-RS, necesarias para permitir la demodulación coherente en el enlace ascendente.
- Señales de referencia destinadas al sondeo de la calidad del canal de transmisión, denominadas SRS (por ejemplo, Sounding Reference Signals).

B. CANALES FÍSICOS

Son utilizados para transportar tanto señales de control generadas en la capa física del sistema como los mensajes de control generados en las capas superiores del sistema.

- PUSCH (Physical Uplink Shared Channel): Transmite información de usuario y de control dedicada procedente de capas superiores a la capa física.
- PUCCH (Physical Uplink Control Channel): Contiene información de control del enlace ascendente. En particular transmite: peticiones de asignación de recursos, reconocimientos correspondientes al enlace descendente, información de la calidad del canal.
- PRACH (Physical Random Access Channel): Canal físico de acceso aleatorio. Envía un preámbulo para iniciar, por parte del móvil, el procedimiento de conexión al sistema.

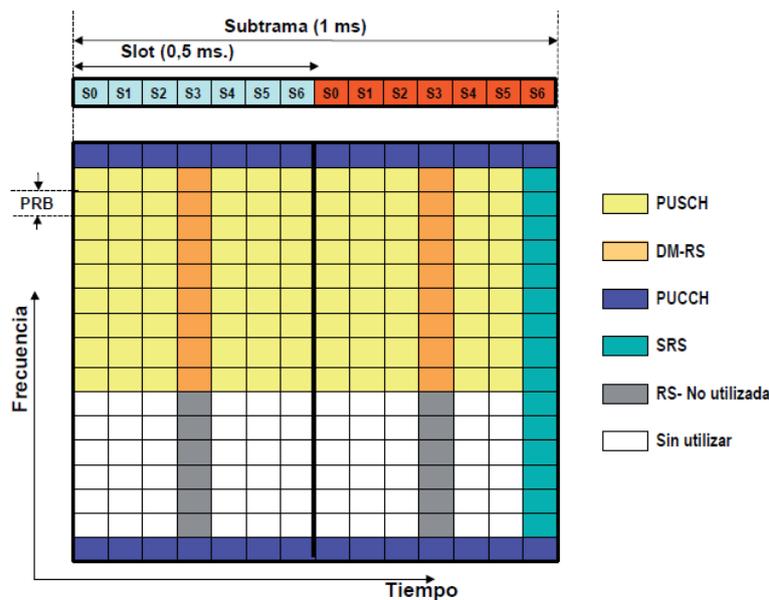


Figura 2.32 Ubicación en el RB de los canales de control, canales de datos y señales de referencia para el enlace ascendente [6]

2.5 GRADO DE SERVICIO

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 propio Workshop se identificaron una serie de requisitos de alto nivel que buscan mejorar el servicio prestado hasta el momento en la redes de comunicaciones móviles, tales como: un costo por bit reducido, mejora en la provisión de servicios, flexibilidad en el uso de las bandas de frecuencia, arquitectura simplificada con interfaces abiertas, consumo razonable

de potencia en los terminales, etc.

Tras considerarse y discutirse múltiples propuestas sobre la capa física, protocolos radio, arquitectura de red, aspectos de RF, consideraciones de complejidad, etc., algunos de los aportes ofrecidos por LTE son:

- _ Interfaz radioeléctrica basada en OFDMA para el enlace descendente (DL) y SC-FDMA para el enlace ascendente (UL).
- _ Tecnología Multi-antena: Antenas inteligentes MIMO (Conexión de entrada Múltiple - Conexión de Salida Múltiple).
- _ Arquitectura de red totalmente basada en IP.
- _ Velocidad pico downlink de 100 Mbps, con un ancho de banda de 20 MHz.
- _ Velocidad pico uplink de 50 Mbps, con un ancho de banda de 20 MHz.
- _ Técnicas de modulación usando esquemas de QPSK, 16 QAM, y 64 QAM para el downlink, mientras BPSK, QPSK, 8 PSK and 16QAM serían empleados para el uplink.
- _ Operación en los modos TDD y FDD.
- _ Baja latencia en el plano de usuario (menor a 10 ms) y alto throughput.
- _ Flexibilidad en la elección del espectro de frecuencias empleado (1.25 MHz; 2.5 MHz; 5 MHz; 10 MHz; 5 MHz y 20 MHz), permitiendo al operador la posibilidad de diseñar su red acorde con sus necesidades.
- _ Incremento de la eficiencia espectral (mayor que 5bits/s/Hz), sobre los recursos espectrales disponibles.
- _ Reducción de los costes de inversión (CAPEX) y de operación (OPEX).
- _ Ampliación y mejora de los servicios ya prestados y una mayor integración con los protocolos ya existentes.
- _ Interconexión con redes de acceso heterogéneas.
- _ Soporte de diversos tipos de terminales.

CAPÍTULO III

ESTIMACIÓN DEL MERCADO POTENCIAL EN LA CIUDAD DE TRUJILLO

La demanda de servicios y requerimientos técnicos en el ámbito de las telecomunicaciones son aspectos importantes que todo operador debe tener en consideración para poder satisfacer las necesidades de sus clientes.

En este capítulo se realizará un análisis del mercado del proyecto, basado en estudios: socioeconómico, demográfico y situación actual de los servicios de telecomunicaciones. Este último aspecto será básicamente en datos obtenidos de la empresa América Móvil Perú SAC.

3.1 INFORMACIÓN GENERAL

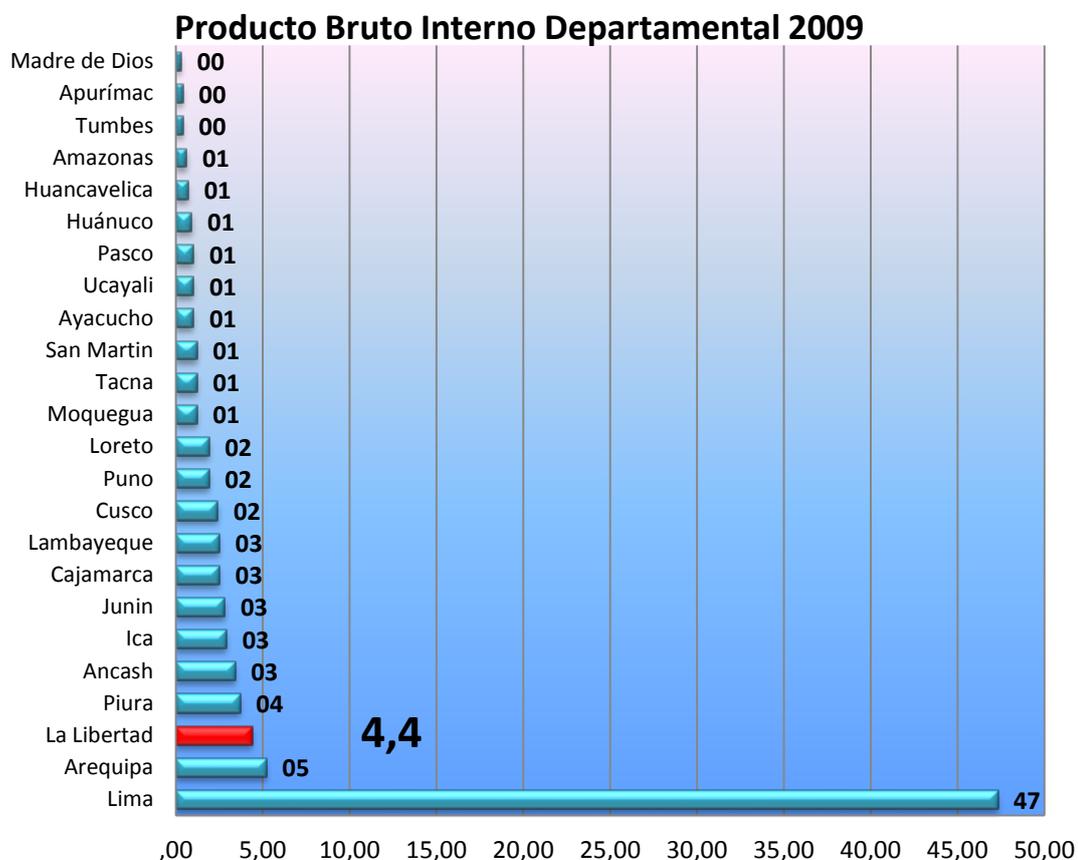


Figura 3.1 Producto Bruto Interno Departamental 2009 valores a precio constantes de 1994. [15] [Elaboración Propia].

La provincia de Trujillo, capital del Departamento de La Libertad, es una de las provincias de mayor panorama en el Perú. Pertenece al tercer departamento de mayor población en el Perú y es a nivel nacional la cuarta provincia con mayor población. Además, posee un alto índice de comercio. Activa y vigorosa, funciona como lugar clave para un importante sector del norte peruano.

Según el último informe técnico de INEI, sobre el Producto Bruto Interno por Departamentos (2009), el departamento de La Libertad se encuentra entre los 3 departamentos con mayor incremento a nivel nacional. Esto se muestra en la Figura 3.1.

En selección de la provincia de Trujillo como piloto para una red LTE no solo se tomó en cuenta el incremento de su PBI sino también se consideraron indicadores demográficos, sociales y económicos, basados en el Censo 2007 realizado por el INEI.

Indicadores demográficos:

- _ Población por departamentos a nivel Nacional, en la Figura 3.2 se puede observar que La Libertad es el 3^{er} departamento con mayor población en el Perú.
- _ Población por provincias a nivel Nacional, en el Tabla 3.1 se puede observar que Trujillo es la 4^{ta} provincia con mayor población.
- _ Densidad poblacional por provincias en el departamento de La Libertad, en el Tabla 3.2 se observa que la densidad poblacional del Departamento de La Libertad es de 63.41 mil Hab/Km² superior al promedio nacional (21.3 Hab/Km²), siendo la provincia de Trujillo la de mayor densidad con 459.10 Hab/Km².



Figura 3.2 Departamento más y menos poblados en el Perú [16].

PERÚ: PROVINCIAS CON MAYOR Y MENOR POBLACIÓN, 2007
(Miles de habitantes)

Mayor Población		Menor Población	
• Lima	7 605,7	• Huanca Sancos	10,6
• Prov. Const. del Callao	876,9	• Jorge Basadre	9,9
• Arequipa	864,3	• Ocros	9,2
• Trujillo	812,0	• Asunción	9,1
• Chiclayo	757,5	• Candarave	8,4
• Piura	666,0	• Cajatambo	8,4
• Maynas	493,0	• Corongo	8,3
• Huancayo	466,3	• Aija	8,0
• Santa	396,4	• Tarata	7,8
• Cusco	367,8	• Purús	3,7

Tabla 3.1 Provincias con mayor y menor población en el Perú [16].

LA LIBERTAD: DENSIDAD POBLACIONAL Y ALTITUD, SEGÚN PROVINCIA, 2007					
Departamento Provincia	Superficie (Kilómetros cuadrados)	Población censada 21/oct/2007 (Habitantes)	Densidad poblacional (Habitantes por kilómetro cuadrado)	Capital de provincia	
				Nombre	Altitud (Metros sobre el nivel del mar)
La Libertad //	25 499,90	1 617 050	63,41		
Trujillo	1 768,65	811 979	459,10	Trujillo	34
Ascope	2 055,47	116 229	43,77	Ascope	230
Bolívar	1 718,86	16 650	9,69	Bolívar	3 129
Chepén	1 142,48	75 960	66,51	Chepén	130
Julcán	1 101,39	32 985	29,95	Julcán	3 404
Oluzco	2 110,77	88 817	42,08	Oluzco	2 641
Pacasmayo	1 126,67	94 377	83,77	San Pedro de Lloco	43
Patate	4 226,53	78 389	18,55	Tayabamba	3 209
Sánchez Carrión	2 486,38	136 221	54,79	Huamachuco	3 169
Santiago de Chuco	2 658,96	58 320	21,93	Santiago de Chuco	3 099
Gran Chimú	1 284,77	30 399	23,66	Cascaz	1 274
Viro	3 214,54	76 710	23,86	Viro	68

Tabla 3.2 Departamento más y menos poblados en el Perú [16]

Indicadores Sociales y Económicos:

_ Participación económica de la población, la fuerza de trabajo o población económicamente activa, en el departamento de La Libertad, esa constituida por 903,4 mil personas, de las cuales el 95.7% están en la condición de ocupado. Esto se muestra en la Figura 3.3.

_ Distribución de centros comerciales por distritos en la provincia de Trujillo, en el año 2008 en la provincia de Trujillo se concentró el mayor número de establecimientos censados, 37 mil 386, los cuales representan el 69.3% del total departamental. Esto se muestra en la Figura 3.4.



Figura 3.3 Participación en la actividad económica [17]



Figura 3.4 Establecimientos comerciales en la provincia de Trujillo [18]

3.1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

Trujillo, conocida como la Ciudad de la Eterna Primavera, es la capital del departamento de La Libertad. Se encuentra ubicada en la parte noreste de Perú próxima a las costas del océano Pacífico, en una región costera desértica, a la margen izquierda y derecha del río Moche. En la Figura 3.5 se muestra su ubicación geográfica en el Perú.

Esta ciudad fue fundada en 1534 por Miguel de Estete. A inicios de la etapa republicana fue capital provisional de Perú. Fue considerada por la revista “América Economía”, en el año 2009, como la segunda de mayor crecimiento del Latinoamérica; además, es considerada en el puesto 40 entre las mejores ciudades para hacer negocios en Latinoamérica. Su actividad económica está basada en la agricultura (sus principales

productos son la caña de azúcar y el algarrobo), industria del cuero y calzado, metalmecánica, comercio y turismo. En general, la provincia de Trujillo es heredera de un valioso patrimonio arqueológico y cultural de las antiguas culturas pre-hispánicas Mochica-Chimú, materializados en la zonas arqueológicas de Las Huacas del Sol y de la Luna, ciudadela de Chan Chan, Complejo arqueológico El Brujo; Huaca del Dragón o Arco Iris.



Figura 3.5 Ubicación de Trujillo



Figura 3.6 Distritos de Trujillo Metropolitano.

El área metropolitana de Trujillo comprende la parte baja del Valle de Moche o Valle de Santa Catalina y los inter-valles hasta el valle de Chicama hacia el norte y el valle de Virú hacia el sur. Comprende los distritos del continuo urbano como son Trujillo, Víctor Larco Herrera, El Porvenir, Florencia de Mora y La Esperanza, los centros poblados urbanos y rurales de los distritos del área integrada de la Metrópoli tales como son Huanchaco, Laredo, Moche y Salaverry. En la Figura 3.6 se pueden observar los mencionados distritos.

3.1.2 ANÁLISIS DE LA POBLACIÓN

Según los resultados del Censo Nacional 2007, realizado por el INEI, la provincia de Trujillo cuenta con una población de 811 979 habitantes, concentrando el mayor volumen poblacional del norte peruano.

En el Tabla 3.3, se puede observar que Trujillo es el distrito con mayor población (36.32 %), seguido del distrito de La Esperanza (18.7 %) y siendo Poroto el distrito de menor de población (0.44 %).

Distrito	Población 2007	Superficie (Km)	Densidad poblacional (Hab/Km)
Trujillo	294899	39.36	7 492.4
El Porvenir	140507	36.7	3 828.5
Florencia de Mora	40014	1.99	20 107.5
Huanchaco	44806	333.9	134.2
La Esperanza	151845	15.55	9 765
Laredo	32825	335.44	97.9
Moche	29727	25.25	1 177.3
Poroto	3601	276.01	13
Salaverry	13892	295.88	47
Simbal	4082	390.55	10.5
Víctor Larco Herrera	55781	18.02	3 095.5
Provincia Trujillo	811979	1768.65	459.1

Tabla 3.3 Población en los distritos de la provincia de Trujillo [16]

Actualmente, no se cuenta con una fuente de información que nos proporcione la población actual en los distritos de la provincia de Trujillo, pero el INEI mediante su

boletín N° 18 titulado “Perú: Estimaciones y Proyecciones de población por sexo, según departamento, provincia y distrito, 2010 - 2015” presenta una proyección del crecimiento de la población (ver Anexo A). En la Tabla 3.4 se muestra un resumen de estas proyecciones. Se observa que hasta el 2015 el distrito de Trujillo debería contar con 318 914 habitantes, presentando una tasa de crecimiento promedio anual del 0.5 %. La Esperanza, segundo distrito más importante, debería tener para el año 2015 con 182 494 habitantes.

Distrito	Población 2007	Superficie (Km)	Densidad poblacional (Hab/Km)
Trujillo	294899	39.36	7 492.4
El Porvenir	140507	36.7	3 828.5
Florencia de Mora	40014	1.99	20 107.5
Huanchaco	44806	333.9	134.2
La Esperanza	151845	15.55	9 765
Laredo	32825	335.44	97.9
Moche	29727	25.25	1 177.3
Poroto	3601	276.01	13
Salaverry	13892	295.88	47
Simbal	4082	390.55	10.5
Víctor Larco Herrera	55781	18.02	3 095.5
Provincia Trujillo	811979	1768.65	459.1

Tabla 3.4 Estimaciones y proyecciones por distritos de la provincia de Trujillo, periodo 2010 - 2015 [Anexo A]

3.1.3 POBLACIÓN ECONÓMICAMENTE ACTIVA

La población económicamente activa (PEA) representa a las personas que se han incorporado al mercado laboral y están en posibilidad de ejercer alguna actividad económica.

En el Tabla 3.5 se muestra resultados de la PEA en los distintos distritos de la provincia de Trujillo, obtenidas en el Censo 2007. Se observa que el distrito de Trujillo presenta el segundo mayor porcentaje de PEA (41.84 %) en relación a la cantidad de habitantes por distrito, siendo el distrito de Víctor Larco Herrera el de mayor porcentaje de densidad

distrital de PEA (42.48 %). Sin embargo, el distrito de Trujillo presenta el mayor porcentaje de PEA (15.19 %) en relación a cantidad de habitantes en la provincia de Trujillo.

Distrito	PEA Total	Población Censada	PEA total / Población distrital	PEA Total / Población provincial
Trujillo	123373	294899	41.84%	15.19%
El Porvenir	55668	140507	39.62%	6.86%
Florencia de Mora	16524	40014	41.30%	2.04%
Huanchaco	17764	44806	39.65%	2.19%
La Esperanza	58439	151845	38.49%	7.20%
Laredo	12530	32825	38.17%	1.54%
Moche	11867	29727	39.92%	1.46%
Poroto	1349	3601	37.46%	0.17%
Salaverry	4847	13892	34.89%	0.60%
Simbal	1428	4082	34.98%	0.18%
Victor Larco Herrera	23694	55781	42.48%	2.92%
Provincia Trujillo	327483	811979		

Tabla 3.5 PEA en los distritos de la provincia de Trujillo [16]

El número total de PEA en la provincia de Trujillo es de 327 483. Sin embargo, para la delimitación del mercado que se quiere satisfacer solo se tomará en cuenta la PEA ocupada, puesto que el servicio a ofrecer será post-pago. En el Tabla 3.6 se muestra la cantidad de personas que están dentro de los grupos PEA ocupados y PEA desocupados. De esta tabla se puede concluir que el en distrito de Trujillo el 96.04% de la PEA se encuentra ocupado, ubicándolo en primer lugar dentro de la provincia de Trujillo. Además, su porcentaje de PEA ocupado se encuentra por encima de PEA de la provincia de Trujillo que tiene un valor porcentual del 95.98%.

Este análisis realizado a la PEA de los distritos de la provincia de Trujillo nos da una mayor visión de los potenciales distritos en donde se puede llevar a cabo la implementación de nuestro proyecto, siendo el distrito de Trujillo el de mayor atracción.

Distrito	PEA Ocupada		PEA Desocupada		PEA Total
	Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje	
Trujillo	118488	96.04%	4885	3.96%	123373
El Porvenir	53409	95.94%	2259	4.06%	55668
Florencia de Mora	15842	95.87%	682	4.13%	16524
Huanchaco	17159	96.59%	605	3.41%	17764
La Esperanza	56054	95.92%	2385	4.08%	58439
Laredo	11973	95.55%	557	4.45%	12530
Moche	11402	96.08%	465	3.92%	11867
Poroto	1302	96.52%	47	3.48%	1349
Salaverry	4612	95.15%	235	4.85%	4847
Simbal	1327	92.93%	101	7.07%	1428
Victor Larco Herrera	22754	96.03%	940	3.97%	23694
Provincia Trujillo	314322	95.98%	13161	4.02%	327483

Tabla 3.6 PEA en los distritos de la provincia de Trujillo [16]

3.2 SITUACIÓN ACTUAL DE LAS TELECOMUNICACIONES

El mercado de telecomunicaciones en el Perú se encuentra en constante ascenso, básicamente las telecomunicaciones móviles. Con el avance de la tecnología y la aparición de tecnologías móviles de banda ancha, se permite el incremento de los servicios ofrecidos por las operadoras, así como el número de usuarios. A continuación se mostrará la situación de los servicios ofrecidos por los diferentes operadores en La Libertad. Estos servicios los clasificamos en:

- _ Servicio de Telefonía Fija.
- _ Servicio móvil.
- _ Servicio de Acceso a Internet.

3.2.1 SERVICIO DE TELEFONÍA FIJA

El Servicio de Telefonía Fija es uno de los principales mercados en el campo de los servicios públicos de telecomunicaciones en nuestro medio. La alta concentración en la provisión de este servicio, el número y la participación de empresas se han incrementado gradualmente.

En cuanto al crecimiento en el mercado, este será analizado a través de los siguientes indicadores:

- _ Líneas fijas en servicio.
- _ Densidad de líneas fijas en servicio
- _ Finalmente se realizara una comparación porcentual de la participación de las distintas empresas en el mercado.

En la Figura 3.7 se muestra la evolución del incremento de línea fijas instaladas en el departamento de la Libertad. Se observa que este servicio, en la última década, ha sufrido un 115.30% de incremento.

En la Figura 3.8, se muestra que la densidad (por cada 100 habitantes) de este servicio se incrementó 88.68%.

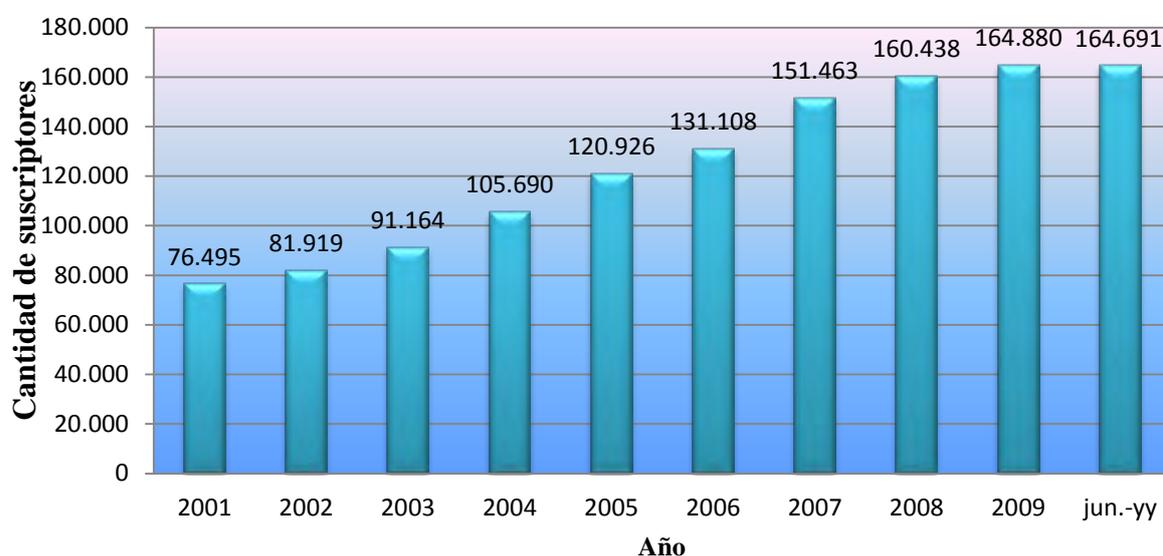


Figura 3.7 Cantidad de líneas fijas en servicio en el departamento de La Libertad [19]

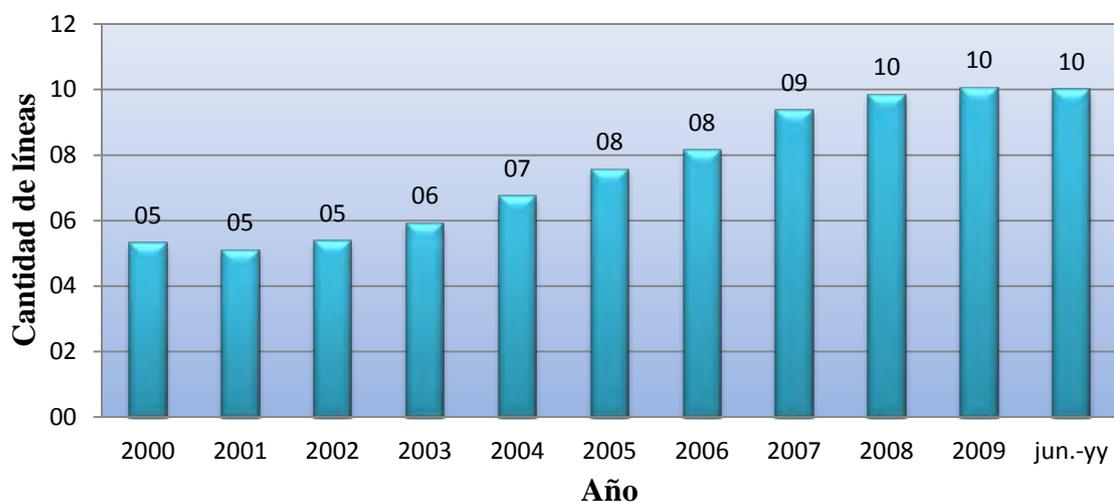


Figura 3.8 Densidad de líneas fijas instaladas en el departamento de La Libertad [19]

Básicamente, la empresa que lidera este mercado es Telefónica del Perú, pero también existen otros operadores. La participación de cada operador de muestra en la Figura 3.9.

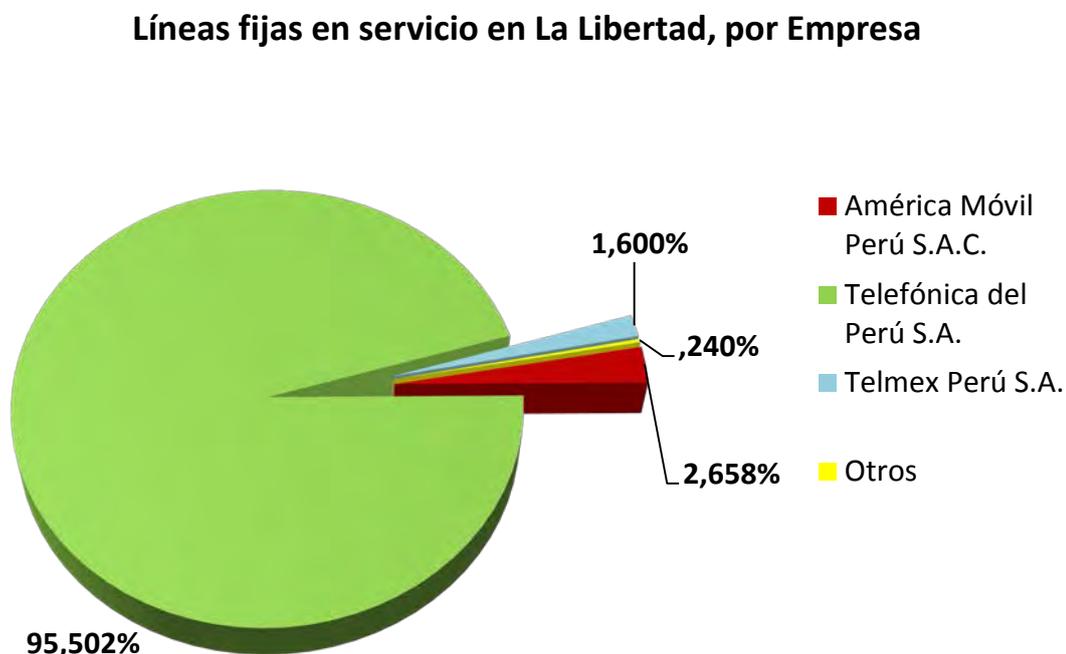


Figura 3.9 Participación de las empresas operadoras en el mercado de líneas fijas en servicio en el departamento de La Libertad [19]

3.2.2 SERVICIO MÓVIL

Este mercado supera año tras año su tasa de crecimiento obtenida en el año precedente, lo que impacta directamente en una mayor cobertura. Aquí hay varios indicadores que se deben tomar en cuenta para analizar estos cambios:

- _ Número de empresas operadoras.
- _ Número de líneas.
- _ Penetración del servicio.

A junio del 2010, son tres las empresas que operan en el mercado peruano de servicios móviles: Telefónica Móviles, Nextel del Perú y América Móvil.

En la Tabla 3.7 se muestra la presencia de cada uno de estos operadores en los en cada uno de los diferentes distritos de Trujillo. En esta tabla se puede observar que los tres operadores cuentan con presencia en la mayoría de los distritos de Trujillo, siendo Telefónica Movistar y América Móvil los que se ofrecen una cobertura total.

Distrito	Movistar	América Móvil	Nextel
Trujillo	X	X	X
El Porvenir	X	X	X
Florencia de Mora	X	X	X
Huanchaco	X	X	X
La Esperanza	X	X	X
Laredo	X	X	X
Moche	X	X	X
Poroto	X	X	
Salaverry	X	X	X
Simbal	X	X	
Víctor Larco Herrera	X	X	X

Tabla 3.7 Operadores móviles en los distritos de la provincia de Trujillo [19]

En cuanto al crecimiento en el mercado, éste debe ser analizado a través de dos indicadores importantes como son el número de líneas y el nivel de penetración del servicio para saber cuántos habitantes tienen acceso a un teléfono móvil. En la Figura 3.10 se observa que a mitad del año 2010 la cantidad de líneas en servicio se incrementó en un 8.79% en comparación del año 2009.

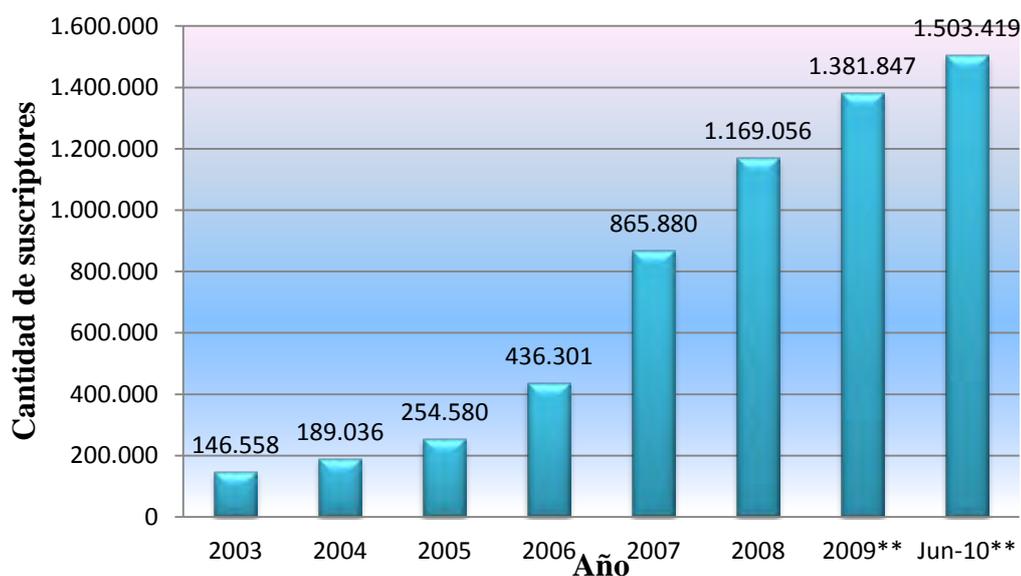


Figura 3.10 Líneas móviles en servicio en el departamento de La Libertad [19].

En cuanto a la penetración de los servicios móviles, las cifras revelan que se ha dado una evolución considerable desde 2003, cuando sólo 9.5 personas de cada 100 habitantes tenía un terminal móvil. A junio del 2010, esa cifra se elevó a 91.5. Esta mejora se detalla en la Figura 3.11.

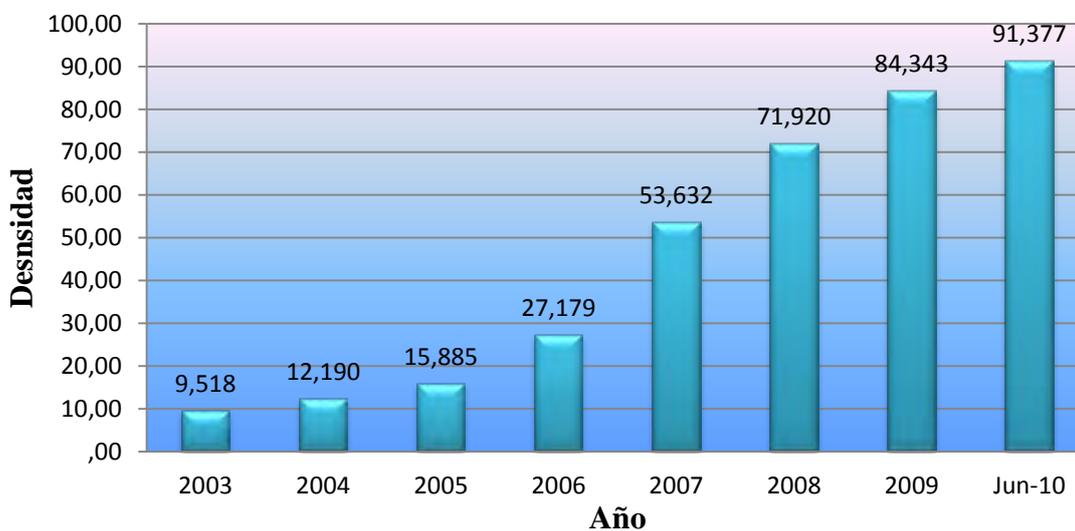


Figura 3.11 Densidad de líneas móviles en servicio en el departamento de La Libertad [19]

Para el caso de los servicios móviles es muy importante analizar de manera separada la evolución de los servicios prepago y los post-pago. En la Figura 3.12 se observa que la cantidad de líneas prepago ha sufrido un incremento bajo en comparación a los años precedentes.

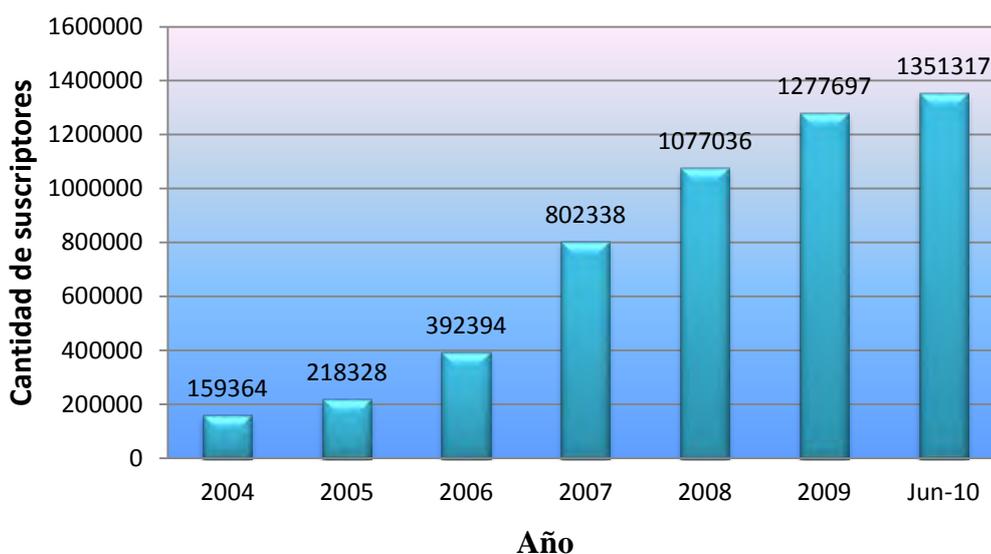


Figura 3.12 Cantidad de líneas móviles pre-pago en servicio en el departamento de La Libertad [19].

Líneas pre-pago en servicio en la Libertad (por empresa)

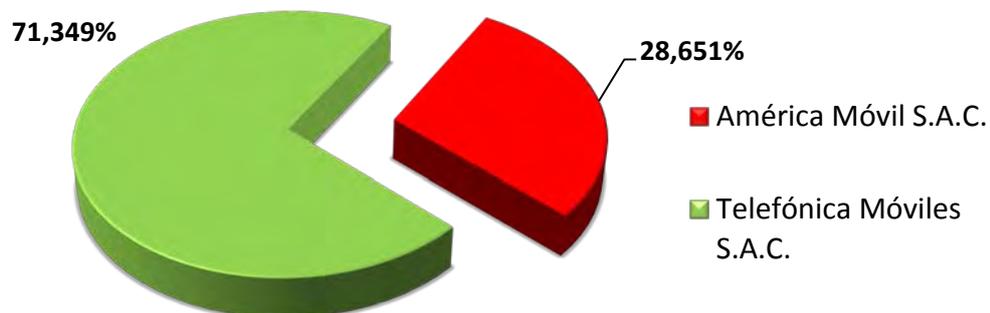


Figura 3.13 Participación de las principales empresas operadoras en el mercado de servicio móvil pre-pago en el departamento de La Libertad [19]

En la Figura 3.13 se observa que Telefónica del Perú es la empresa dominante en este servicio.

Por otra parte, la cantidad de usuarios móviles post-pago a evolucionado de manera significativa en los últimos años. En la Figura 3.14 se observa que en junio del 2010 este servicio se incrementó en un 65% en relación al 2009.

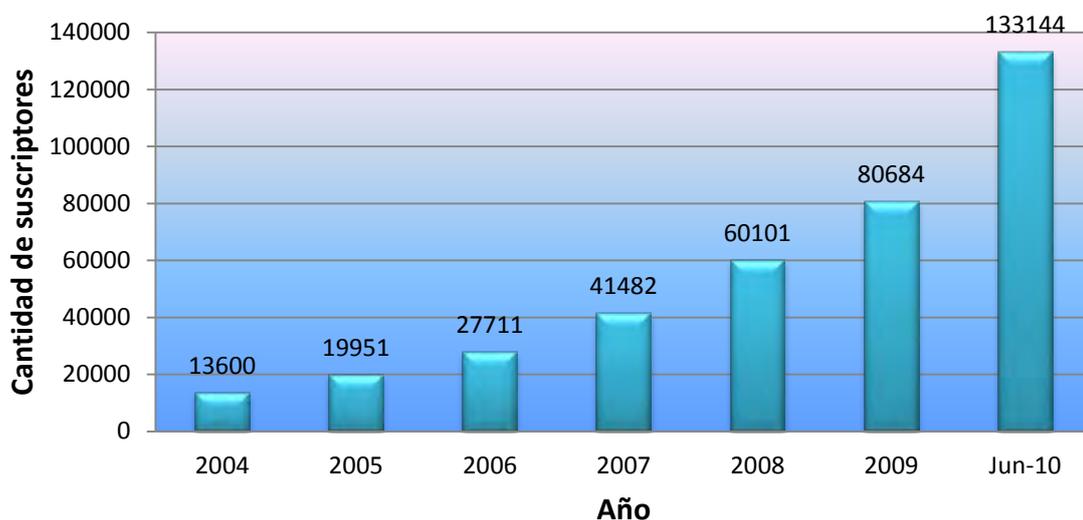


Figura 3.14 Cantidad de líneas móviles en la modalidad post-pago en servicio en el departamento de La Libertad [19].

En la Figura 3.15 se muestra que Telefónica del Perú también predomina en este servicio.

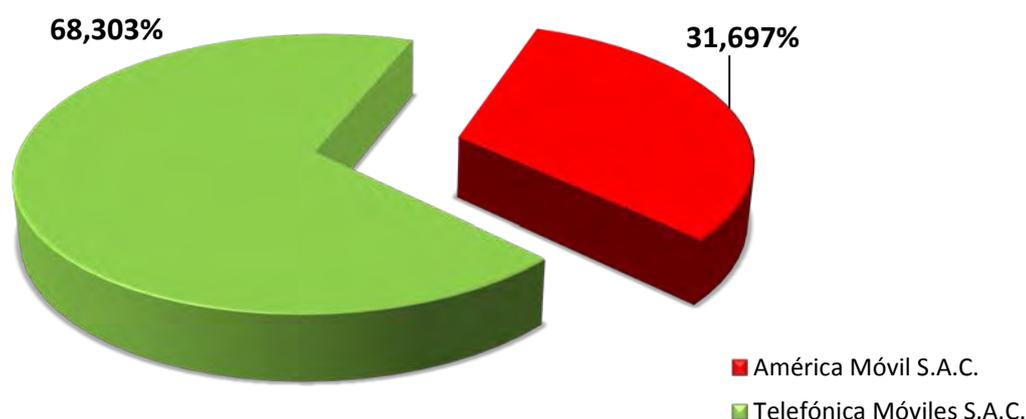


Figura 3.15 Participación de las principales empresas operadoras en el mercado de servicio móvil post-pago en el departamento de La Libertad [19]

3.2.3 SERVICIO DE ACCESO A INTERNET

Otro mercado de telecomunicaciones en expansión es el de Acceso a Internet. Los usuarios de este servicio pueden acceder a éste a través de diferentes modalidades: accesos conmutados (dial-up), líneas dedicadas alámbricas e inalámbricas, ADSL, cable modem, y, finalmente, vía WAP y otros.

Al respecto, la demanda por este servicio, en general, ha ido creciendo en los últimos años, a una tasa relativamente constantemente. En la Figura 3.16 se muestra esta evolución.

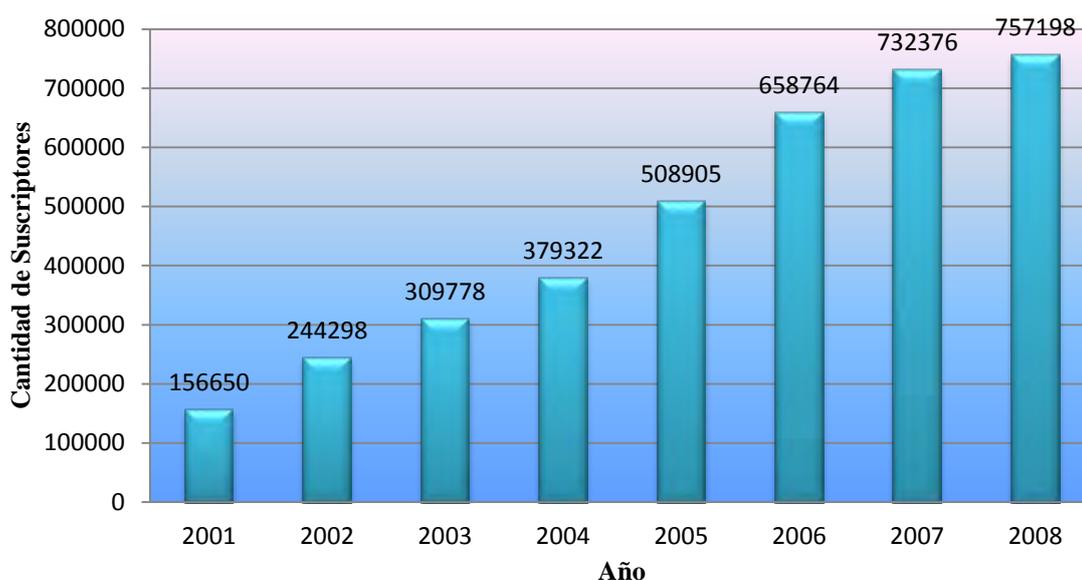


Figura 3.16 Evolución anual del número de suscriptores al servicio de Acceso a Internet

Debido al incremento de usuarios, el tráfico de datos ha crecido de manera exponencial. Evolución que tiene relación directa con la variedad de aplicaciones que se están desarrollando para aplicaciones móviles (principalmente para Smartphone), lo cual ha obligado a los operadores a realizar trabajos de reingeniería con la finalidad de cubrir la demanda de tráfico de datos no cubierta por sus redes 2G y 3G. A pesar de estos trabajos, los usuarios no se sienten satisfechos con el servicio recibido.

En la Figura 3.17 se representa el problema central, así como, las causas y efectos que este tiene sobre la ciudad, basados en la relación de Causalidad C-E.

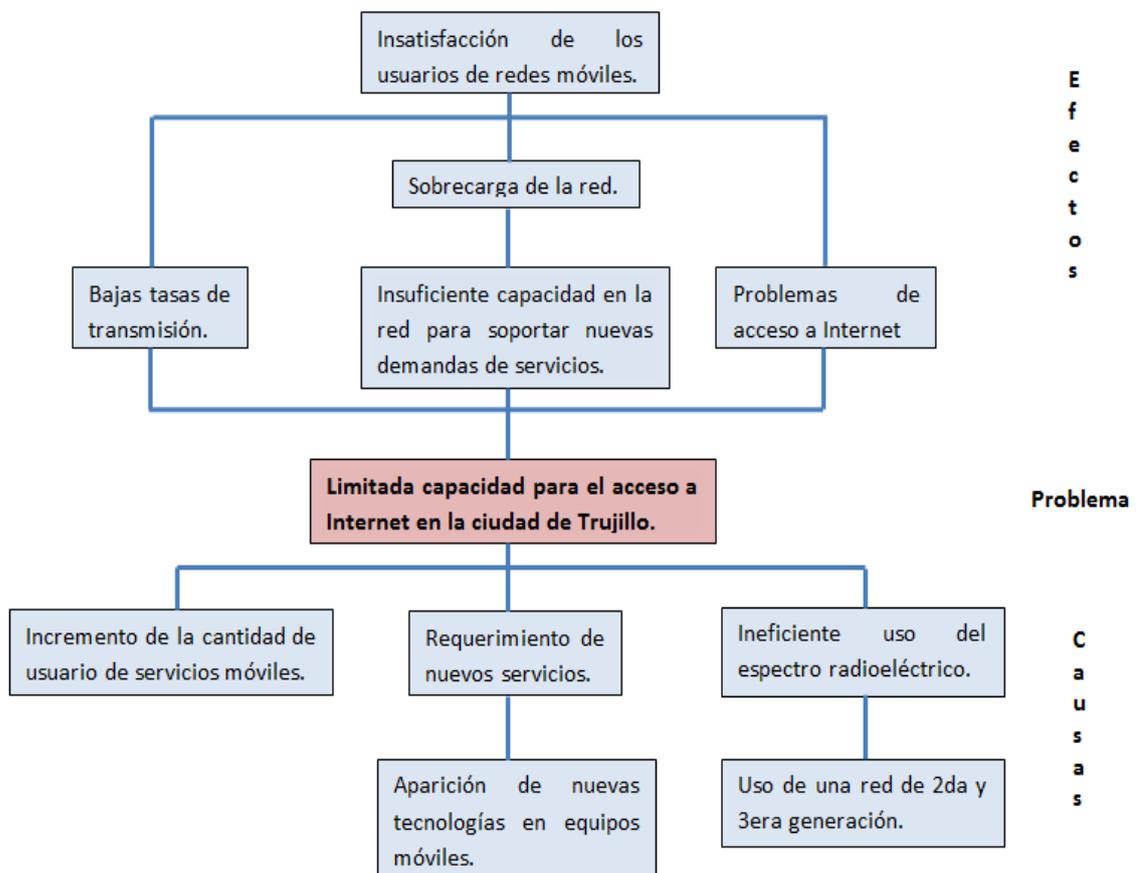


Figura 3.17 Relación de Causalidad C-E [Elaboración propia]

Ante estas limitaciones, es necesario plantear una solución que logre ofrecer un servicio que se capaz de cubrir las necesidades de los usuarios. Es por ello que el objetivo central de este proyecto es la implementación de una red móvil de banda ancha, la que podrá soportar los actuales y futuros servicios para aplicaciones móviles. La tecnología seleccionada será LTE, definida por 3GPP.

Esta solución se encuentra reflejada en la Figura 3.18.

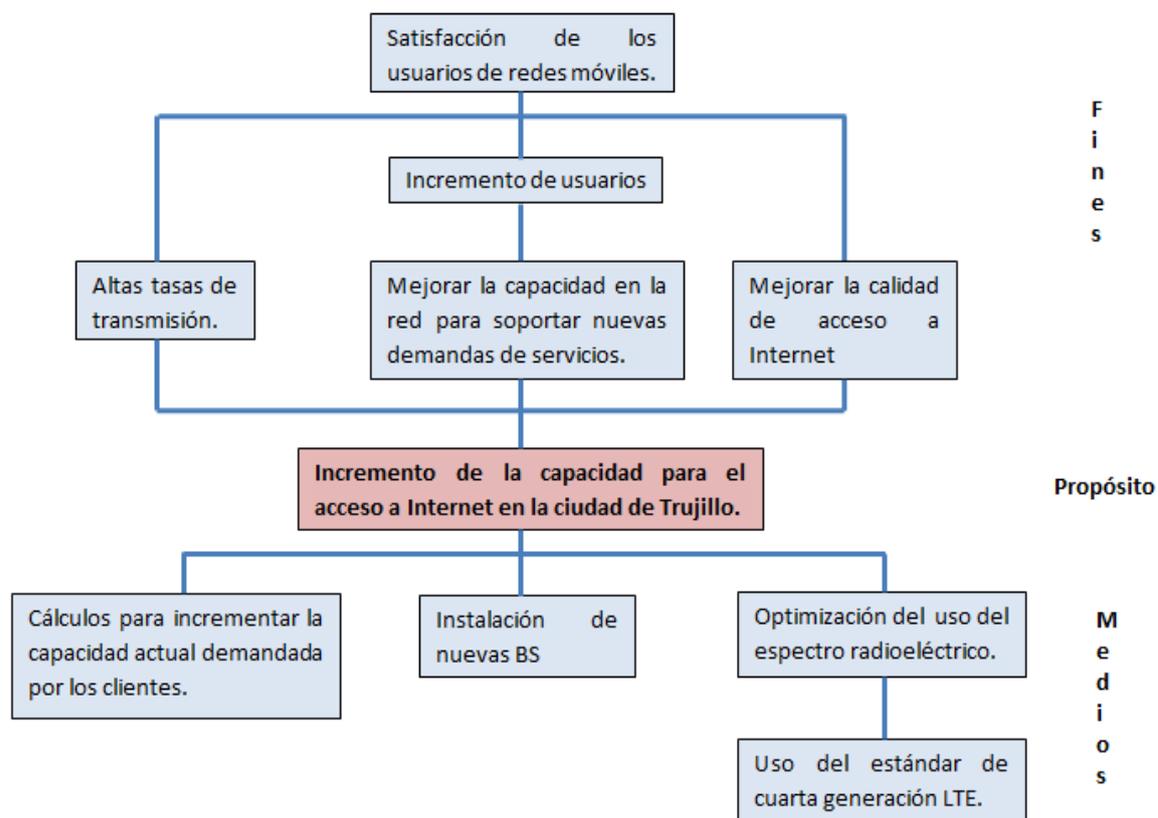


Figura 3.18 Árbol de objetivos: Medios y Fines [Elaboración propia]

3.3 DETERMINACIÓN DEL MERCADO Y SERVICIOS

3.3.1 DETERMINACIÓN DEL MERCADO

El dimensionamiento de nuestro proyecto estará planteado en 3 fases, según se detalla en el Tabla 3.8.

Fase	Distrito
1ra Fase	Trujillo
2da Fase	La Esperanza
	El Porvenir
	Víctor Larco Herrera
3ra Fase	Huanchaco
	Florencia de Mora
	Laredo
	Moche
	Salaverry

Tabla 3.8 Fases del proyecto [Elaboración propia]

La primera fase consiste en la incursión del servicio LTE tomando como piloto al distrito de Trujillo. En una segunda fase se considerara a los distritos de La Esperanza, El

Porvenir y Víctor Larco Herrera. En la etapa final se busca integral a todos los distritos de Trujillo Metropolitano.

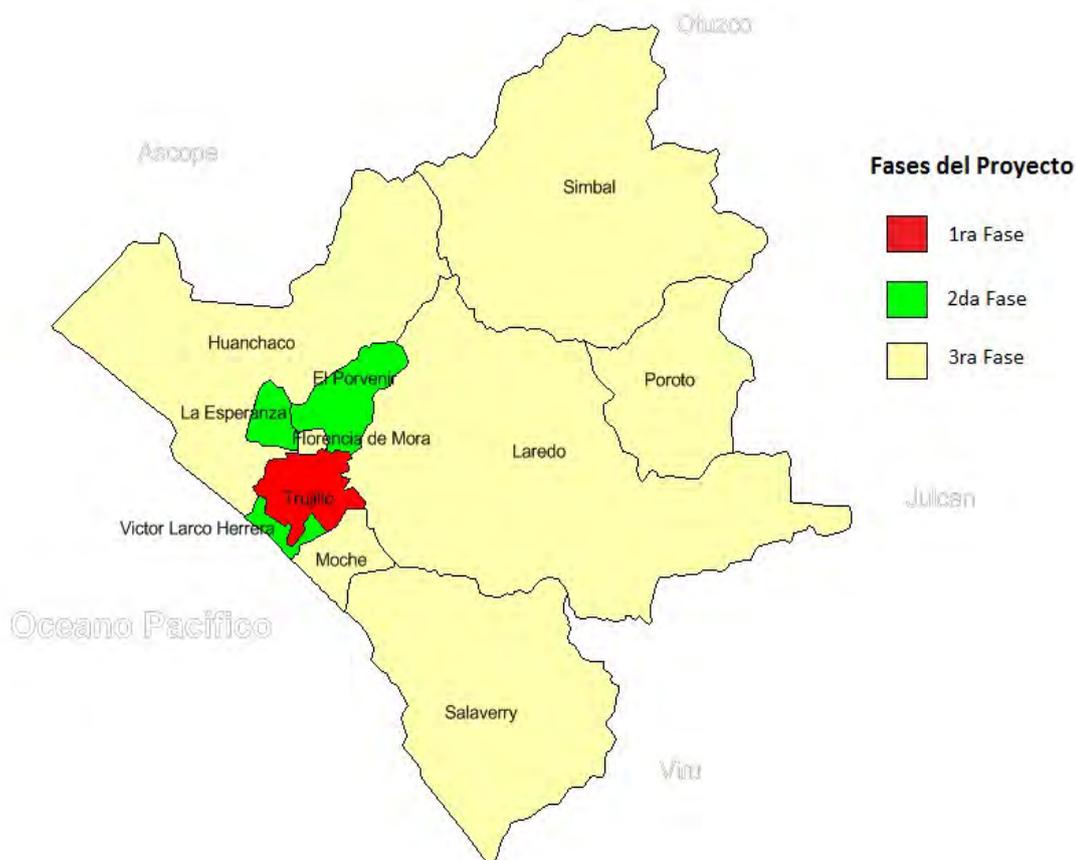


Figura 3.17 Geografía de las fases del proyecto [Elaboración propia].

La Figura 3.17 nos permite visualizar las fases mencionadas. Estas fases de expansión han sido determinadas en base a la información de la situación socio-económica actual de Trujillo Metropolitano, prevaleciendo en un principio la densidad poblacional y la cantidad de personas económicamente activas ocupadas.

Básicamente las razones por la cual se toma a Trujillo con distrito piloto son:

- _ Es el distrito con mayor población (36.32 %) en la provincia de Trujillo.
- _ Mayor porcentaje de PEA (15.19%) del total de PEA en la provincial de Trujillo.
- _ Mayor porcentaje de PEA ocupada 96.04%, de su PEA distrital.

Este trabajo se centrará en el diseño de la primera fase de la red. Como se mencionó anteriormente nuestro mercado objetivo está formado por la población económicamente activa ocupada. Adicionalmente, el mercado estará limitado a clientes de servicios post-pago.

En la Tabla 3.9 se muestran cifras del PEA ocupado, clientes de servicio telefónico e Internet, de donde se puede concluir que el 41% de la PEA ocupada cuenta con servicio telefónico.

Distrito	PEA Ocupada	Servicio telefónico móvil
Trujillo	118 488	49 403

Tabla 3.9 Cantidad de usuarios con servicio telefónico móvil [16] [Elaboración propia].

De acuerdo a la evolución de los clientes pre-pago y post-pago se tiene que la cantidad de clientes post-pago representa en promedio el 12% de las personas que cuentan con servicio de telefónico móvil.

Para conocer la cantidad de personas que forman nuestro mercado objetivo se tomaran las siguientes consideraciones:

- _ El universo de la población será la población proyectada para el 2015.
- _ El porcentaje de la PEA ocupa respecto a la población total será del 40.18% (igual al censo 2007).
- _ El porcentaje de personas que cuentan con servicio de telefonía móvil será del 41% de la PEA ocupada (igual al censo 2007).
- _ Los clientes post-pago representan el 12% de los clientes de telefonía móvil.

La Tabla 3.10 nos muestra el mercado objetivo para nuestro diseño.

Distrito	Población	PEA ocupada	Telefonía móvil	Mercado objetivo
Trujillo	318 914	128 139	52 536	6304

Tabla 3.10 Mercado objetivo para el diseño de la red [Elaboración propia]

3.3.2 DETERMINACIÓN DE LOS SERVICIOS A OFRECER

Los servicios que se ofrecerán son:

- _ Servicio de VoIP.
- _ Servicio de Acceso a Internet.

Estos servicios serán ofrecidos con una vigencia mensual y mediante una cartera de planes, los cuales estarán orientados a diferentes perfiles de clientes.

A. Plan Básico:

Este plan es creado para estudiantes universitarios y profesionales de bajos recursos que desean usar internet en sus equipos móviles. El plan comprende 100 min de voz y

acceso a Internet con una capacidad de descarga de 2 Gb a una velocidad de descarga de 512 Kbps (garantizándose un 10%). En la actualidad, Claro ofrece un servicio similar en minutos de voz pero de menor capacidad de descarga a un costo promedio de \$ 25.00. Al ofrecer un servicio de mayor calidad el costo de este plan será de \$ 30.00.

B. Plan Negocios

Este plan esta creado para pequeños negocios, profesionales y jóvenes empresarios. Este plan incluye servicio de voz hasta 300 min y acceso a internet con una capacidad de descarga de 10 Gb con una velocidad asegurada de 1 Mbps. En la actualidad, Claro también ofrece un servicio similar en minutos de voz pero de menor capacidad de descarga a un costo promedio de \$ 85.00. Al ofrecer un servicio de mayor calidad el costo de este plan será de \$ 100.00.

C. Plan Empresarial

Este plan esta creado para empresas que desean contar con un servicio A1. Este plan incluye servicio de voz hasta 500 min y acceso a internet con una capacidad de descarga de 100 Gb y una velocidad asegurada de 2 Mbps. En la actualidad, los operadores no ofrecen planes similares a este.

En Tabla 3.11 se muestra un resumen de los planes que se ofrecerán.

Plan	Minutos	Capacidad	Costo
Básico	100	2 Gb	\$ 30
Negocio	300	10 Gb	\$ 100
Empresario	500	100 Gb	\$ 300

Tabla 3.11 Planes ofrecidos [Elaboración propia]

CAPÍTULO IV DISEÑO DE RED

En el capítulo previo se realizó un estudio económico y situación actual de las telecomunicaciones del distrito de Trujillo, seleccionado como nuestro mercado al distrito de Trujillo. El presente capítulo abarcará el diseño topológico de la red, tomando en cuenta la red de acceso, la red de transporte y la infraestructura necesaria para el despliegue de la red LTE propuesta.

Nuestro diseño de la red de acceso estará basado en cálculos de cobertura y capacidad que nos puede ofrecer cada eNB independientemente de la cantidad de clientes que se desea atender. Estos cálculos serán comparados con las demandas de servicios y capacidades que se tienen del mercado, logrando de esta manera calcular el número y ubicación geográfica de los eNBs.

4.1 ELECCIÓN DE BANDA DE FRECUENCIA Y MODELO DE PROPAGACIÓN

4.1.1 BANDA DE FRECUENCIA

La capa física de LTE está pensada para trabajar en bandas altas de UHF, por encima de los 450 MHz y hasta los 3,5 GHz. El estándar define hasta 40 posibles bandas de operación trabajando bien en modo de duplexación por división de frecuencia (FDD) o bien en duplexación por división en el tiempo (TDD). En la Tabla 4.1 se muestran las bandas de frecuencia sobre las cuales trabaja LTE, tanto en FDD como en TDD.

Actualmente los fabricantes están construyendo soluciones para FDD, por cual la banda con la que se trabajará estará comprendida entre las bandas del 1 al 17. En la Tabla 4.2 están tabulados los valores de N_{OFF_DL} y N_{OFF_UL} , así como, los posibles rangos de valores de N_{DL} y N_{UL} para cada una de las posibles bandas de operación del sistema.

Es importante destacar que, dada una banda de operación, no existe un valor fijo de la frecuencia portadora sino un rango de posibles valores con una separación entre ellos igual al valor del Channel Raster (la mínima separación entre posibles frecuencias portadoras es 100 KHz).

La nota en la Tabla 4.2 nos indica algunas restricciones que tienen los canales respecto a los anchos de bandas, según:

E-UTRA Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit	Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive	Duplex Mode
	F _{UL_low} – F _{UL_high}	F _{DL_low} – F _{DL_high}	
1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD
3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
4	1710 MHz – 1755 MHz	2110 MHz – 2155 MHz	FDD
5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894 MHz	FDD
6	830 MHz – 840 MHz	875 MHz – 885 MHz	FDD
7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	FDD
8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz – 1784.9 MHz	1844.9 MHz – 1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz – 1770 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz – 1452.9 MHz	1475.9 MHz – 1500.9 MHz	FDD
12	698 MHz – 716 MHz	728 MHz – 746 MHz	FDD
13	777 MHz – 787 MHz	746 MHz – 756 MHz	FDD
14	788 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz	FDD
...			
17	704 MHz – 716 MHz	734 MHz – 746 MHz	FDD
...			
33	1900 MHz – 1920 MHz	1900 MHz – 1920 MHz	TDD
34	2010 MHz – 2025 MHz	2010 MHz – 2025 MHz	TDD
35	1850 MHz – 1910 MHz	1850 MHz – 1910 MHz	TDD
36	1930 MHz – 1990 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	TDD
37	1910 MHz – 1930 MHz	1910 MHz – 1930 MHz	TDD
38	2570 MHz – 2620 MHz	2570 MHz – 2620 MHz	TDD
39	1880 MHz – 1920 MHz	1880 MHz – 1920 MHz	TDD
40	2300 MHz – 2400 MHz	2300 MHz – 2400 MHz	TDD

Tabla 4.1 Banda de frecuencias LTE [13]

E-UTRA Operating Band	Downlink			Uplink		
	F _{DL_low} [MHz]	N _{oms-DL}	Range of N _{DL}	F _{UL_low} [MHz]	N _{oms-UL}	Range of N _{UL}
1	2110	0	0 – 599	1920	18000	18000 – 18599
2	1930	600	600 – 1199	1850	18600	18600 – 19199
3	1805	1200	1200 – 1949	1710	19200	19200 – 19949
4	2110	1950	1950 – 2399	1710	19950	19950 – 20399
5	869	2400	2400 – 2649	824	20400	20400 – 20649
6	875	2650	2650 – 2749	830	20650	20650 – 20749
7	2620	2750	2750 – 3449	2500	20750	20750 – 21449
8	925	3450	3450 – 3799	880	21450	21450 – 21799
9	1844.9	3800	3800 – 4149	1749.9	21800	21800 – 22149
10	2110	4150	4150 – 4749	1710	22150	22150 – 22749
11	1475.9	4750	4750 – 4999	1427.9	22750	22750 – 22999
12	728	5000	5000 – 5179	698	23000	23000 – 23179
13	746	5180	5180 – 5279	777	23180	23180 – 23279
14	758	5280	5280 – 5379	788	23280	23280 – 23379
...						
17	734	5730	5730 – 5849	704	23730	23730 – 23849
...						
33	1900	36000	36000 – 36199	1900	36000	36000 – 36199
34	2010	36200	36200 – 36349	2010	36200	36200 – 36349
35	1850	36350	36350 – 36949	1850	36350	36350 – 36949
36	1930	36950	36950 – 37549	1930	36950	36950 – 37549
37	1910	37550	37550 – 37749	1910	37550	37550 – 37749
38	2570	37750	37750 – 38249	2570	37750	37750 – 38249
39	1880	38250	38250 – 38649	1880	38250	38250 – 38649
40	2300	38650	38650 – 39649	2300	38650	38650 – 39649

NOTE: The channel numbers that designate carrier frequencies so close to the operating band edges that the carrier extends beyond the operating band edge shall not be used. This implies that the first 7, 15, 25, 50, 75 and 100 channel numbers at the lower operating band edge and the last 6, 14, 24, 49, 74 and 99 channel numbers at the upper operating band edge shall not be used for channel bandwidths of 1.4, 3, 5, 10, 15 and 20 MHz respectively.

Tabla 4.2 Canales LTE [13]

_ Los primeros 7, 15, 25, 50, 75 y 100 canales no pueden usar anchos de banda de 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz respectivamente.

_ Los últimos 6, 14, 24, 49, 74 y 99 canales no pueden usar anchos de banda de 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz respectivamente.

Estas restricciones surgen del hecho de que al ubicar la portadora de los canales extremos, se debe garantizar que el canal ocupe sólo una porción del ancho de banda asignado y que su espectro no se desborde hacia los canales adyacentes que se encuentran a ambos lados del canal de interés. Por ejemplo, si tenemos un canal de 10 MHz de ancho de banda, su portadora en el extremo inferior debe estar separada de la frecuencia mínima al menos en 5 MHz, que es la mitad del ancho de banda. Dado que el channel raster es de 0.1 MHz, $5/0.1=50$, por lo que los primeros 50 canales (del 0 al 49) no pueden usarse. En general la cantidad de canales prohibidos es $(BW/2)/0.1$, el BW expresado en MHz. Un procedimiento igual se aplica para el extremo superior. En la Tabla 4.3 podemos observar con mayor detalle los anchos de banda permitidos de acuerdo a la bandas.

E-UTRA band / channel bandwidth						
E-UTRA Band	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
1			Yes	Yes	Yes	Yes
2	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes ^[1]	Yes ^[1]
3	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes ^[1]	Yes ^[1]
4	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
5	Yes	Yes	Yes	Yes ^[1]		
6			Yes	Yes ^[1]		
7			Yes	Yes	Yes	Yes ^[1]
8	Yes	Yes	Yes	Yes ^[1]		
9			Yes	Yes	Yes ^[1]	Yes ^[1]
10			Yes	Yes	Yes	Yes
11			Yes	Yes ^[1]		
12	Yes	Yes	Yes ^[1]	Yes ^[1]		
13			Yes ^[1]	Yes ^[1]		
14			Yes ^[1]	Yes ^[1]		
...						
17			Yes ^[1]	Yes ^[1]		
18			Yes	Yes ^[1]	Yes ^[1]	
19			Yes	Yes ^[1]	Yes ^[1]	
20			Yes	Yes ^[1]	Yes ^[1]	Yes ^[1]
21			Yes	Yes ^[1]	Yes ^[1]	
...						
33			Yes	Yes	Yes	Yes
34			Yes	Yes	Yes	
35	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
36	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
37			Yes	Yes	Yes	Yes
38			Yes	Yes	Yes	Yes
39			Yes	Yes	Yes	Yes
40			Yes	Yes	Yes	Yes

NOTE 1: bandwidth for which a relaxation of the specified UE receiver sensitivity requirement (Clause 7.3) is allowed.

Tabla 4.3 Anchos de bandas permitidos por bandas en LTE [13]

En el Perú, Pro inversión emitió las bases del concurso de licitación pública para la

concesión de dos bloques de la banda de 1710 - 1770 MHz y 2110 - 2170 MHz a nivel nacional, aunque, sin definir fechas en su cronograma. Estas bandas conocidas como AWS (Advanced Wireless Services) es una de las que se viene usando en el despliegue de redes móviles LTE en EEUU, y es candidata para ser usada en varios países de América Latina, favoreciendo el futuro roaming en la región cuando esta tecnología se haga masiva.

La canalización realizada por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) y aprobada según Resolución Viceministerial 456-2011-MTC/03 del 29 de abril de 2011, dispone de tres bloques, mostrado en la Tabla 4.4, de los cuales solo los bloques A y B serán puestos en concesión por 20 años.

Bloque	Rango de frecuencias (MHz)	
	Subida	Bajada
A	1710 - 1730	2110 – 2130
B	1730 – 1750	2130 – 2150
C	1750 – 1770	2150 – 2170

Tabla 4.4 Sub bandas permitidas para el uso de LTE en el Perú [24]

La disponibilidad de una canalización con anchos de banda de 2x20 MHz en la banda AWS (20 MHz para el canal de subida y 20 MHz para la bajada), permitirá a los operadores nacionales que ganen esta licitación implementar redes LTE y ofrecer velocidades de datos de más de 120 Mbps (por sector) usando antenas MIMO 2x2. Esta velocidad podría duplicarse con antenas MIMO 4x4 en los próximos años

Aún queda por licitar en el Perú un bloque de la banda AWS y la banda de 700 MHz para LTE (que usa Verizon y AT&T en EEUU), que ofrece una mejor prestación en términos de cobertura, sin embargo, en el ámbito nacional están aún siendo ocupadas por algunos canales de programación religiosa (banda UHF), que podrían ser reubicados como canales de televisión digital. También, el MTC podría estar a la espera de la decisión final del 3GPP respecto a la región de Asia Pacífico (APAC) donde se podría definir una banda de 700 MHz: FDD de 2x45 MHz o TDD de 100 MHz. Esta banda puede ser canalizada en bloques de 2x15 o 2x20 MHz que ofrecen mayor capacidad que los bloques de 2x10 MHz que se viene empleando en EEUU.

En nuestro diseño usaremos la nomenclatura (Banda, N_{DL} , BW) para identificar el canal sobre el cual se trabajará. De lo expuesto en los párrafos anteriores, se trabajará en la banda 10, un identificador de frecuencia (canal) igual a 4250 y un ancho de banda igual a

20 MHz. Por lo tanto nuestro identificador es (10, 4250, 20) para el enlace de bajada.

4.1.2 MODELO DE PROPAGACIÓN

Para el cálculo de propagación, se usará el modelo a gran escala: Cost 231- Hata [20]. Este modelo define la pérdida de propagación mediante las ecuaciones 4.1 y 4.2.

$$L_p = 46.3 + 33.9 \log f - 13.82 \log h_{BS} - a_{UE} + (44.9 - 6.55 \log h_{BS}) \log d + C \quad (4.1)$$

$$a_{UE} = (1.1 \log f - 0.7)h_{UE} - (1.56 \log f - 0.5) \quad (4.2)$$

Donde:

f : Frecuencia (MHz)

h_{BS} : Altura de la estación base.

h_{UE} : Altura del móvil.

d : Distancia entre el eNB y UE.

C : $\begin{cases} 0 & \text{zona rural} \\ 3 & \text{zona urbana} \end{cases}$

4.2 CÁLCULOS DE COBERTURA

Los cálculos de cobertura están vinculados directamente a los cálculos de Link Budget. El Link Budget, o presupuesto del enlace, permite cuantificar todas las ganancias y todas las pérdidas del enlace con el objetivo de obtener las máximas pérdidas admisibles para cumplir con un requisito de calidad dado por el SNR o el Eb/No. Una vez conocida la máxima pérdida que permite el sistema se puede calcular el radio de cobertura usando un modelo de gran escala apropiado, en nuestro caso ya se indicó que se usará el modelo Cost 231- Hata.

4.2.1 CÁLCULO DE LA SENSIBILIDAD DEL RECEPTOR PARA CADA MODULACIÓN

La sensibilidad se define como la mínima potencia recibida por el receptor para cumplir con el requerimiento de la relación señal a ruido SNR o Eb/No. En la ecuación 4.3 se define su cálculo [20].

$$S_{dBm} = -174 \frac{dBm}{Hz} + 10 \log BW_{dBm*Hz} + NF_{dB} + SINR_{dB} + IM_{dB} - 3dB \quad (4.3)$$

Donde:

_ BW : Ancho de banda del canal (Hz).

_ NF : Figura de ruido del receptor (dB).

– *IM*: Margen de implementación (dB).

Mientras menor sea la sensibilidad mejor es el receptor pero también es más costoso; es decir, a menor sensibilidad el receptor puede trabajar con niveles de potencia menores lo que permite que los sistemas tengan una mayor cobertura.

En las especificaciones de LTE la densidad de ruido, término kT , se define como -174 dBm/Hz donde k es la constante de Boltzmann (1.380662×10^{-23}) y T es la temperatura (expresada en grados Kelvin).

El SINR requerido está definido por la tecnología que se esté usando y depende entre otros del objetivo de calidad de BER, de la modulación y de la codificación de canal usada.

La figura de ruido del receptor (NF) es una medida de la degradación de la SINR causados por los componentes de la cadena de la señal de radiofrecuencia. Es decir, la figura de ruido NF es una medida de cuanto ruido adiciona el receptor a la señal y se manifiesta como una reducción en la SNR a la salida en comparación con la entrada. LTE define un requisito de no sobrepasar los valores de 9 dB para el UE y 5 dB para un eNB.

El IM es un margen que considera las diferencias teóricas y prácticas del SINR. También considera la degradación de la señal debido al tratamiento digital que se le aplica y el uso de demoduladores no ideales.

Adicionalmente, se aplica un factor de corrección de 3 dB para dar cuenta del uso de antenas de recepción de doble ganancia.

En nuestro análisis los cálculos serán realizados tanto para el enlace de bajada como para el enlace de subida.

A. ENLACE DE BAJADA

En este caso se considera que el equipo transmisor es el eNB y el equipo receptor es el UE. Debido a que LTE presenta sistemas de modulación y codificación de canal adaptativos, el SINR obliga a variar la modulación y codificación. En la Tabla 4.5 se muestran los valores del SINR establecido en los requerimientos de LTE para las distintas combinaciones de modulación y tasas de codificación.

El ancho de banda asignado según la banda seleccionada tiene un valor de 20 MHz, pero para cálculos se necesita obtener el ancho de banda efectivo.

En el capítulo 2 se indicó que la asignación de recursos depende de la canalización. De la Tabla 2.7 se obtiene que para una canalización de 20 MHz se tienen asignados 100 PRBs. Adicionalmente, se sabe que el ancho de banda de cada PRB es de 180 KHz. Por lo tanto, el ancho de banda efectivo será según lo indicado en la Ecuación 4.4.

System	Modulation	Code rate	SINR (dB)	IM (dB)	SINR+IM (dB)
LTE UE	QPSK	1/8	-5.1	2.5	-2.6
		1/5	-2.9		-0.4
		1/4	-1.7		0.8
		1/3	-1		1.5
		1/2	2		4.5
		2/3	4.3		6.8
		3/4	5.5		8.0
		4/5	6.2		8.7
	16QAM	1/2	7.9	3	10.9
		2/3	11.3		14.3
		3/4	12.2		15.2
		4/5	12.8		15.8
	64QAM	2/3	15.3	4	19.3
		3/4	17.5		21.5
		4/5	18.6		22.6

Tabla 4.5 Variación del SINR en función de la modulación y tasa de codificación [5]

$$\begin{aligned}
 BW_{efectivo} &= \#PRB's \times BW_{PRB} \\
 &= 100 \times 180 \text{ KHz} \\
 &= 18\text{MHz}
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

Modulación	Tasa de codificación	SINR en Rx (dB)	IM (dB)	Sensibilidad en el UE (dBm)
QPSK	1/8	-5.1	2.5	-98.0473
	1/5	-2.9	2.5	-95.8473
	1/4	-1.7	2.5	-94.6473
	1/3	-1	2.5	-93.9473
	1/2	2	2.5	-90.9473
	2/3	4.3	2.5	-88.6473
	3/4	5.5	2.5	-87.4473
	4/5	6.2	2.5	-86.7473
16-QAM	1/2	7.9	3	-84.5473
	2/3	11.3	3	-81.1473
	3/4	12.2	3	-80.2473
	4/5	12.8	3	-79.6473
64-QAM	2/3	15.3	4	-76.1473
	3/4	17.5	4	-73.9473
	4/5	18.6	4	-72.8473

Tabla 4.6 Valores de sensibilidad en el enlace de bajada [Elaboración propia]

En la Tabla 4.6 se representan los cálculos obtenidos, para cada modulación y tasa de codificación, al reemplazar los valores señalados para nuestro diseño en la Ecuación 4.3. En la Figura 4.1 se puede observar las variaciones de la sensibilidad de acuerdo al tipo de modulación para el enlace de bajada.

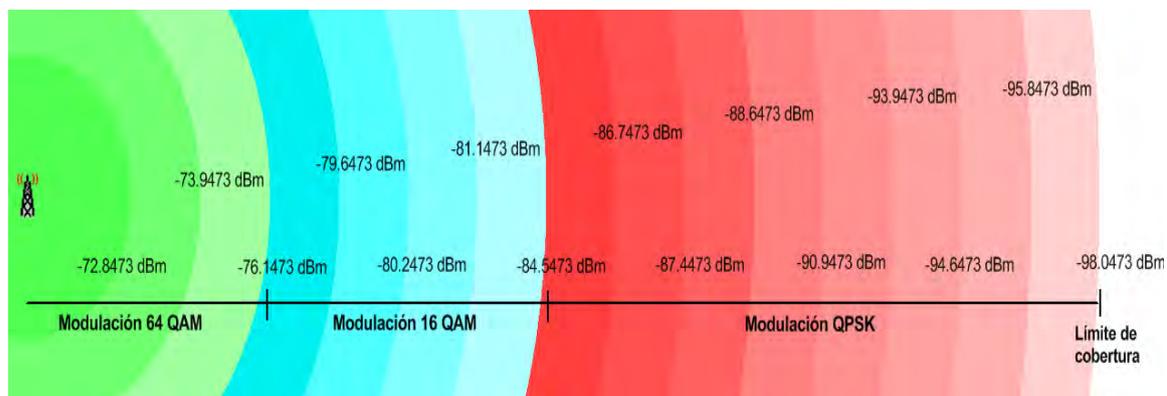


Figura 4.1 Variaciones de sensibilidad en el enlace de bajada [Elaboración propia]

B. ENLACE DE SUBIDA

En este caso se considera que el equipo transmisor es el UE y el equipo receptor es el eNB. El ancho de banda asignado al UE es de 1.8 MHz, el cual está en función de los equipos que están siendo ofrecido por el mercado (equipo de categoría tipo 3).

Modulación	Tasa de codificación	SINR en Rx (dB)	IM (dB)	Sensibilidad en el eNB (dBm)
QPSK	1/8	-5.1	2.5	-112.0473
	1/5	-2.9	2.5	-109.8473
	1/4	-1.7	2.5	-108.6473
	1/3	-1	2.5	-107.9473
	1/2	2	2.5	-104.9473
	2/3	4.3	2.5	-102.6473
	3/4	5.5	2.5	-101.4473
	4/5	6.2	2.5	-100.7473
16-QAM	1/2	7.9	3	-98.5473
	2/3	11.3	3	-95.1473
	3/4	12.2	3	-94.2473
	4/5	12.8	3	-93.6473
64-QAM	2/3	15.3	4	-90.1473
	3/4	17.5	4	-87.9473
	4/5	18.6	4	-86.8473

Tabla 4.7 Valores de sensibilidad en el enlace de subida [Elaboración propia]

Además, se debe tener en cuenta que en este caso el valor de NF es de 5 dB. La Tabla 4.7 muestra los valores obtenidos al reemplazar valores en la Ecuación 4.3 para el enlace de subida.

En la Figura 4.2 se puede observar las variaciones de la sensibilidad de acuerdo al tipo de modulación para el enlace de subida. De manera muy similar a lo que paso en el enlace de bajada, el valor de la sensibilidad varia de manera inversamente proporcional a la distancia entre el eNB y el terminal móvil.

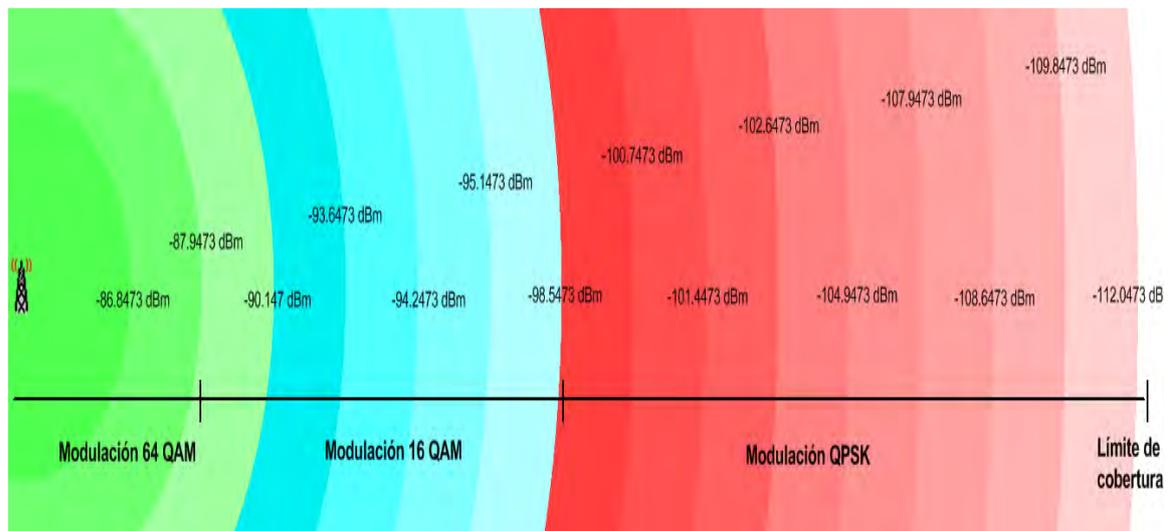


Figura 4.2 Variaciones de sensibilidad en el enlace de subida [Elaboración propia]

4.2.2 RADIO DE COBERTURA DE LA CELDA

Los valores de sensibilidad obtenidos nos permiten realizar los cálculos para obtener el radio de cobertura de la celda. Se debe tener en cuenta el escenario que se analizó, enlace de subida o bajada.

A. ENLACE DE BAJADA

Para los cálculos será necesario contar con los siguientes datos:

- _ Valores de sensibilidad límites en la cobertura de la radio.
- _ Pérdida por propagación.
- _ Máxima pérdida permitida.

➤ Valores de sensibilidad límites en la cobertura de la radio

Los valores límites de la sensibilidad de los equipos terminales están relacionados al tipo de modulación con el que está trabajando el sistema, para nuestro caso tenemos QPSK, 16 QAM y 64 QAM.

De los resultados obtenidos en la Tabla 4.6, podemos definir los valores de sensibilidad

en los bordes de los anillos delimitados por el tipo de modulación, según se detalla en la Tabla 4.8.

Modulación	SINR mínimo en Rx (dB)	SINR máximo en Rx (dB)	Sensibilidad mínima	Sensibilidad máxima
QPSK	-5.1	7.9	-98.0473	-84.5473
16 QAM	7.9	15.3	-84.5473	-76.1473
64 QAM	15.3	18.6	-76.1473	NA

Tabla 4.8 Valores de límites de sensibilidad, según la modulación, para el enlace de bajada
[Elaboración propia]

➤ Pérdida por propagación

En este caso la frecuencia portadora es la frecuencia de bajada y se calcula con la ecuación 4.4 [20]:

$$F_{DL} = F_{DL_LOW} + 0.1(N_{DL} - N_{OFF_DL}) \quad (4.5)$$

Donde:

- _ F_{DL} : Frecuencia de central de bajada.
- _ F_{DL_LOW} : Frecuencia del límite inferior de la banda.
- _ N_{DL} : Identificador de la frecuencia, denominado Absolute Radio Frequency Channel Number del enlace de bajada
- _ N_{OFF_DL} : Indica el identificar inferior de frecuencia dentro del rango de una banda.

Remplazando valores de la Tabla 4.2, de acuerdo al canal seleccionado para nuestro diseño en la Ecuación 4.5, tenemos:

$$F_{DL} = 2110 + 0.1(4250 - 4150) = 2120 \text{ MHz}$$

Conociendo el valor de F_{DL} podemos calcular el a_{UE} . Reemplazando en la ecuación 4.2 obtenemos:

$$a_{UE} = (1.1 \log 2120 - 0.7)1.65 - (1.56 \log 2120 - 0.5) = 0.1932 \text{ dB}$$

Remplazando valores en la ecuación 4.1.

$$L_p = 46.3 + 33.9 \log 2121 - 13.82 \log 33 - 0.1932 + (44.9 - 6.55 \log 33) \log d + 3$$

$$L_p = 140.8837 + 34.9537 \log d \quad (4.6)$$

➤ **Máxima pérdida permitida.**

En todo sistema se radio enlace se cumple:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} - P_{Trayectoria} + G_{Rx} - Margen \quad (4.7)$$

Donde:

- _ P_{Rx} : Potencia disponible en la antena de recepción.
- _ P_{Tx} : Potencia de salida en la antena de transmisión.
- _ G_{Tx} : Ganancia de la antena de transmisión.
- _ $P_{Trayectoria}$: Pérdida de trayecto.
- _ G_{Rx} : Ganancia de la antena de recepción.
- _ $Margen$: Margen de pérdida.

La pérdida de trayectoria permitida será máxima cuando $P_{Rx} = S$. Ordenando la ecuación 4.7, tenemos:

$$P_{Trayectoria (máx)} = MPLA = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - Margen - S$$

$$P_{Trayectoria (máx)} = MPLA = EIPR + G_{Rx} - Margen - S \quad (4.8)$$

El valor de la sensibilidad depende de la modulación que se esté usando y de la ubicación del UE, límite inferior o superior del área de cobertura.

En la Tabla 4.9 se muestran un resumen de las especificaciones técnicas del equipo transmisor (estación base) y del equipo receptor (equipo terminal).

Usando los datos de la Tabla 4.9, y tomando en consideración los datos obtenidos para sensibilidad en la Tabla 4.6, reemplazamos en la Ecuación 4.8 y obtenemos los valores de máxima pérdida permitida para la modulación QPSK.

$$MPLA_{Interno} = 61 + 0 - 12 - (-84.5473)$$

$$MPLA_{Interno} = 133.5473 \text{ dB} \quad (4.9)$$

$$MPLA_{Externo} = 61 + 0 - 12 - (-98.0473)$$

$$MPLA_{Externo} = 147.0473 \text{ dB} \quad (4.10)$$

Características de TX del eNB	Unidades	Valor
Potencia de transmisión PTX	dBm	46.00
Ganancia elemento radiante	dB _i	15.00
Elementos del arreglo de antenas	NA	1
Ganancia por elementos del arreglo	dB	0.00
Ganancia por Beam Forming	dB	0.00
Ganancia por sistema MIMO	dB	0.00
EIRP: Potencia Efectiva Radiada Isotrópica	dBm	61.00
Características de RX del Móvil		
Ganancia de cada elemento radiante de la antena en recepción	dB _i	0.00
Cantidad de Elementos del Arreglo	NA	1.00
Ganancia debida al Arreglo (Diversidad de Antenas)	dB	0.00
Ganancia total en RX	dB	0.00
Márgenes		
Margen de Fading Log Normal	dB	6.0
Fast Fading Margin	dB	2.00
Interference Margin	dB	2.00
Pérdidas debido a Penetración	dB	2.00
Margen Total	dB	12.00

Tabla 4.9 Especificaciones técnicas del equipos transmisor y receptor, en el enlace de bajada [Elaboración propia].

Calculando de forma análoga para las modulaciones 16 QAM y 64 QAM obtenemos los resultados de la Tabla 4.10

Modulación	Sensibilidad		MPLA	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
QPSK	-98.0473	-84.5473	133.5473	147.0473
16 QAM	-84.5473	-76.1473	125.1473	133.5473
64 QAM	-76.1473	NA	NA	125.1473

Tabla 4.10 Valores de MPLA en el enlace de bajada [Elaboración propia].

Para obtener los radios de cobertura será necesario igualar la Ecuación 4.6 con los valores obtenidos en las Ecuaciones 4.9 y 4.10 obtenemos:

Radio interno:

$$140.8837 + 34.9537 \log d = 133.5473$$

$$\log d = -0.2099$$

$$d = 0.6168 \text{ Km}$$

Radio externo

$$140.8837 + 34.9537 \log d = 147.0473$$

$$\log d = 0.1763$$

$$d = 1.5008 \text{ Km}$$

Calculando de forma análoga para las modulaciones 16 QAM y 64 QAM obtenemos los resultados de la Tabla 4.11 que nos muestra el rango de cobertura de los anillos según su modulación.

Modulación	Radio	
	Mínima	Máxima
QPSK	0.6168	1.5008
16 QAM	0.3546	0.6168
64 QAM	NA	0.3546

Tabla 4.11 Radios de cobertura según la modulación en el enlace de bajada [Elaboración propia].

B. ENLACE DE SUBIDA

De manera similar al enlace de bajada será necesario contar con los siguientes datos:

- _ Valores de sensibilidad límites en la cobertura de la radio.
- _ Pérdida por propagación.
- _ Máxima pérdida permitida.

➤ Valores de sensibilidad límites en la cobertura de la radio

De manera similar al enlace de bajada, de los resultados obtenidos en la Tabla 4.7 podemos definir los valores de sensibilidad de la estación base en los bordes de los anillos delimitados por el tipo de modulación, según se detalla en la Tabla 4.12.

Modulación	SINR mínimo en Rx (dB)	SINR máximo en Rx (dB)	Sensibilidad mínima	Sensibilidad máxima
QPSK	-5.1	7.9	-112.0473	-98.5473
16 QAM	7.9	15.3	-98.5473	-90.1473
64 QAM	15.3	18.6	-90.1473	NA

Tabla 4.12 Valores de límites de sensibilidad, según la modulación, en el enlace de subida
[Elaboración propia].

➤ Pérdida por propagación

En este caso la frecuencia portadora es la frecuencia de subida y se calcula con la siguiente ecuación [13]:

$$F_{UL} = F_{UL_LOW} + 0.1(N_{UL} - N_{OFF_UL}) \quad (4.11)$$

Además:

$$N_{UL} = 22250$$

Remplazando valores en la Ecuación 4.11, se obtiene:

$$F_{UL} = 1710 + 0.1(22250 - 22150) = 1720 \text{ MHz.}$$

Conociendo el valor de F_{UL} podemos calcular el a_{UE} . Remplazando en la Ecuación 4.2 tenemos:

$$a_{UE} = (1.1 \log 1715 - 0.7)1.7 - (1.56 \log 1715 - 0.5) = 0.1701 \text{ dB}$$

Remplazando valores en la Ecuación 4.1

$$L_p = 46.3 + 33.9 \log 1720 - 13.82 \log 33 - 0.1701 + (44.9 - 6.55 \log 33) \log d + 3$$

$$L_p = 137.8285 + 34.9537 \log d \quad (4.12)$$

➤ Máxima pérdida permitida.

Similar al cálculo para el enlace de bajada la pérdida permitida será máxima cuando $P_{Rx} = S$.

Características de TX del Móvil LTE		Unidades	Valor
Potencia de transmisión PTX		dBm	23
Ganancia elemento radiante		dB _i	0.00
Elementos del arreglo de antenas		NA	1
Ganancia por elementos del arreglo		dB	0.00
Ganancia por Beam Forming		dB	0.00
Ganancia por sistema MIMO		dB	0.00
EIRP: Potencia Efectiva Radiada Isotrópica		dBm	23
Características de RX de la BS			
Ganancia de cada Elemento Radiante de la Antena en		dB _i	15.00
Cantidad de Elementos del Arreglo		NA	1.00
Ganancia debida al Arreglo (Diversidad de Antenas)		dB	0.00
Ganancia total en Rx		dB	15.00
Márgenes			
Margen de Fading Log Normal		dB	6.0
Fast Fading Margin		dB	2.00
Interference Margin		dB	2.00
Pérdidas debido a Penetración		dB	2.00
Margen Total		dB	12.00

Tabla 4.13 Especificaciones técnicas del equipos transmisor y receptor, en el enlace de bajada [Elaboración propia].

En la Tabla 4.13 se muestran las especificaciones técnicas del equipo transmisor (equipo terminal) el equipo receptor (estación base).

Con los datos obtenidos de la Tabla 4.13 y tomando en consideración los datos obtenidos para sensibilidad en la Tabla 4.7 reemplazamos en la Ecuación 4.8 obtenemos los valores de máxima pérdida permitida, según se detalla en la Tabla 4.14.

Modulación	Sensibilidad		MPLA	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
QPSK	-112.0473	-98.5473	124.5473	138.0473
16 QAM	-98.5473	-90.1473	116.1473	124.5473
64 QAM	-90.1473	NA	NA	116.1473

Tabla 4.14 Valores de máxima pérdida permitida en el enlace de subida [Elaboración propia].

Al igual cada uno de valores de máxima pérdida permitida, obtenidos en la Tabla 4.14, con la ecuación de pérdida por propagación, Ecuación 4.12, obtenemos el rango de cobertura de los anillos según su modulación. La Tabla 4.15 nos muestra estos resultados.

Modulación	Radio	
	Mínima	Máxima
QPSK	0.4169	1.0145
16 QAM	0.2397	0.4169
64 QAM	NA	0.2397

Tabla 4.15 Cobertura según la modulación en el enlace de subida [Elaboración propia].

4.2.3 ÁREA DE COBERTURA DE LA CELDA

En el apartado 4. 3.1 se calculó de manera independiente los radios de cobertura tanto para el enlace de bajada como para el enlace de subida. En la Tabla 4.16 se muestra el denominado “Radio del enlace dominante”, el cual es el menor valor de los obtenidos entre el enlace de bajada y subida.

Modulación	Enlace de bajada		Enlace subida		Enlace dominante	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
QPSK	0.6168	1.5008	0.4169	1.0145	0.4169	1.0145
16 QAM	0.3546	0.6168	0.2397	0.4169	0.2397	0.4169
64 QAM	NA	0.3546	NA	0.2397	NA	0.2397

Tabla 4.16 Radio del enlace dominante [Elaboración propia].

En la Figura 4.3 se puede observar la cobertura según la modulación para el denominado Radio del enlace dominante.

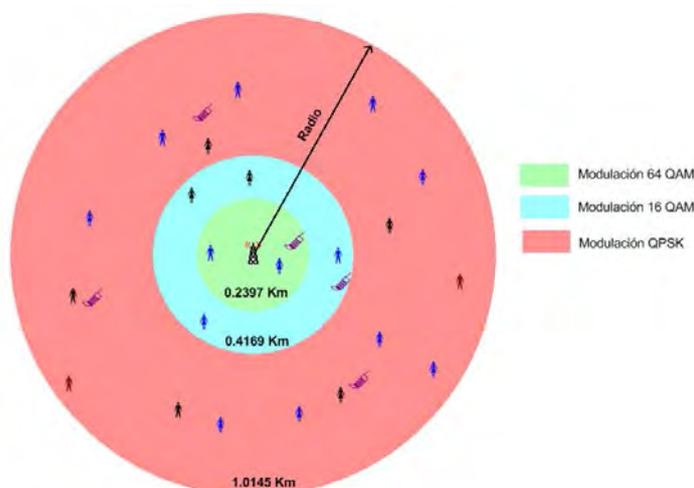


Figura 4.3 Coberturas del enlace dominante según la modulación [Elaboración propia].

El área de cobertura de la celda hexagonal será basada en el mayor radio.

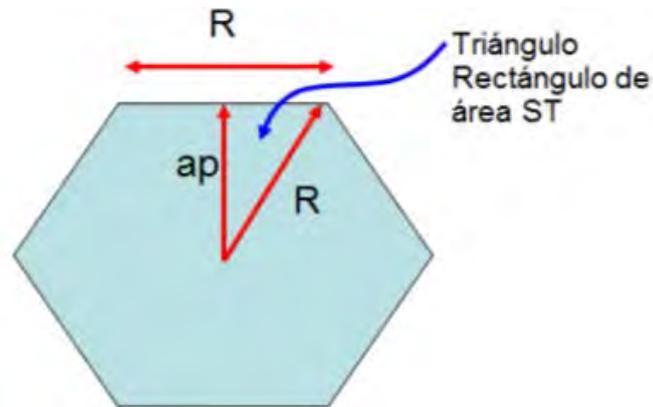


Figura 4.4 Área de una celda [20].

De la figura 4.4 se deduce que el área total del hexágono es:

$$\begin{aligned} \text{Área} &= 12S_T = 12 \times \frac{R}{2} \times a_p \times \frac{1}{2} = 3Ra_p \\ \text{Área} &= 2\sqrt{3}a_p^2 \\ \text{Área} &= 2.598R^2 \end{aligned} \quad (4.13)$$

De la Tabla 4.16 se observa que $R_{\text{máx}} = 1.0145 \text{ Km}$. Reemplazando en ecuación la 4.10:

$$\text{Área} = 2.6739 \text{ Km}^2$$

Debido a que las antenas que se usarán antenas con un diagrama de radiación que solo cubre 120° el área de cobertura real de cada celda A_{celda} será:

$$A_{\text{celda}} = \frac{2.7639}{3} = 0.8913 \text{ Km}^2 \quad (4.14)$$

4.2.4 ANILLOS DE COBERTURA POR MODULACIÓN

En la Tabla 4.17 se muestra las distancias que forman cada anillo de modulación, también se indica el área de cobertura y el porcentaje que representa del área total (todo está basado en radios del enlace dominante obtenidos de la Tabla 4.16).

Se debe tener en cuenta que las áreas que se mencionan solo corresponder a un sector de la celda (la estación consta de 3 sectores).

Modulación	Radio mínimo	Radio máximo	Área del anillo hexagonal	Área total	Porcentaje del área total
QPSK	0.4169	1.0145	0.7408	0.8913	83.1131
16 QAM	0.2397	0.4169	0.1007		11.3033
64 QAM	NA	0.2397	0.0498		5.5836

Tabla 4.17 Áreas de cobertura de un sector [Elaboración propia].

4.3 CAPACIDAD DEL DL Y DEL UL

La capacidad asignada depende del anillo de modulación, los cuales cuenta con una cantidad de recursos proporcionales al porcentaje de área que cubre. Por lo tanto a la modulación QPSK le corresponde el 83.1131% de los recursos, el 11.3033% a 16 QAM y el 5.5836% le corresponde a 64 QAM. Sin embargo, esta repartición está sometida a la condición de que lo que se le asigne a cada modulación sea un submúltiplo de la cantidad de PRBs asignados, de manera que en cada modulación tengamos un número entero de PRBs.

4.3.1 CANTIDAD DE RECURSOS POR MODULACIÓN

Cada sector cuenta con una cantidad de recursos en el DL que debe ser repartida entre los usuarios. Esta repartición será de manera proporcional al porcentaje de área cubierta por modulación. Esto se debe a que los usuarios se distribuyen de una manera aleatoria y que los recursos se asignan bajo demandas dependiendo de parámetros de QoS y el perfil de cada usuario. En nuestra planificación se considera lo siguiente:

- _ Canalización con un $BW = 20 \text{ MHz}$, el cual según el estándar nos permite trabajar con 100 PRBs
- _ Uso de un prefijo cíclico normal por lo que cada PRB está constituido por 7 símbolos y 12 portadoras.
- _ El ciclo de repetición de los principales canales (control y señalización) es de cada 2 PRB. La cantidad básica de REs disponibles es de 168.
- _ Dos símbolos para el canal PDCCH (canal de control), por lo que un total de 168 REs (en una sub-trama o dos slots) nos quedan 144 REs.
- _ Sistema de dos antenas para la transmisión, siendo necesario contar con 16 señales de referencia, pero 4 ellas ya fueron considera en los símbolos del PDCCH. Por lo tanto, se tienen 132 REs disponibles.

Hay que tener en cuenta que LTE considera otras señales y canales de control, pero estas no afectan de manera significativa al cálculo de capacidad.

La capacidad será calculada según la Ecuación 4.15 [6]:

$$C = \frac{\#RE \times \#bits \text{ según modulación}}{0.5ms} \text{ Hz} \quad (4.15)$$

En la Tabla 4.18 se muestra la capacidad por modulación.

Modulación	Enlace de bajada			Enlace subida		
	PRBs	REs	Peak rate	PRBs	REs	Peak rate
QPSK	84	5544	22.176 Mbps	84	5544	22.176 Mbps
16 QAM	10	660	5.28 Mbps	16	1056	8.448 Mbps
64 QAM	6	396	4.752 Mbps	NA	NA	NA

Tabla 4.18 Capacidad según la modulación [Elaboración propia].

Para el enlace de subida se debe tener en cuenta que los equipos terminales que se están proponiendo en la planificación son del tipo 3, los cuales no soportan modulación 64 QAM es por esta razón que la modulación 16 QAM posee mayor recursos que en el enlace de bajada.

4.3.2 CAPACIDAD TOTAL DEL DL Y UL

La capacidad total, en el enlace de subida y enlace de bajada, será la suma de cada una de las capacidades obtenidas por modulación. Según la Ecuación 4.16 [20]:

$$C_{BS} = C_{QPSK} + C_{16 QAM} + C_{64 QAM} \quad (4.16)$$

En la Tabla 4.19 se muestra los resultados obtenidos.

Modulación	Enlace de bajada			Enlace de subida		
	PRBs	REs	Peak rate	PRBs	REs	Peak rate
QPSK	84	5544	22.176 Mbps	84	5544	22.176 Mbps
16 QAM	10	660	5.28 Mbps	16	1056	8.448 Mbps
64 QAM	6	396	4.752 Mbps	NA	NA	NA
Total	100	6600	32.208 Mbps	100	6600	30.624 Mbps

Tabla 4.19 Capacidad total en el enlace de bajada y en el enlace de subida.

Estas capacidades corresponden a un sistema sin multiplexado espacial (MIMO). En el

caso de considerar una estructura MIMO 2x2 las velocidades de pico serán el doble, es decir, en nuestro enlace de bajada podemos llegar a proporcionar capacidades de 64.416 Mbps.

Las capacidades pico reales alcanzadas por un usuario dependen de muchos factores, por ejemplo la calidad del canal de radio, el número de usuarios simultáneos en la celda, el tipo de despliegue realizado por el operador, el tipo de servicio considerado y la calidad (QoS) asociada.

Se debe considerar que las capacidades mostrada en la Tabla 4.20 no representan la capacidad total del eNB, es lo que se puede dar en un momento dado suponiendo que los usuarios están distribuidos en la misma proporción del área de cobertura de cada anillo, caso contrario se obtendrán resultados diferentes.

En la Figura 4.5 se puede observar la variación de las capacidades según la asignación de PRBs por modulación. Por ejemplo, supongamos que todos los usuarios están ubicados en el anillo de 64 QAM tendríamos una capacidad pico de 158.4 Mbps o si todos están ubicados en el anillo de QPSK tendríamos una capacidad de 52.8 Mbps, ambos para el enlace descendente.

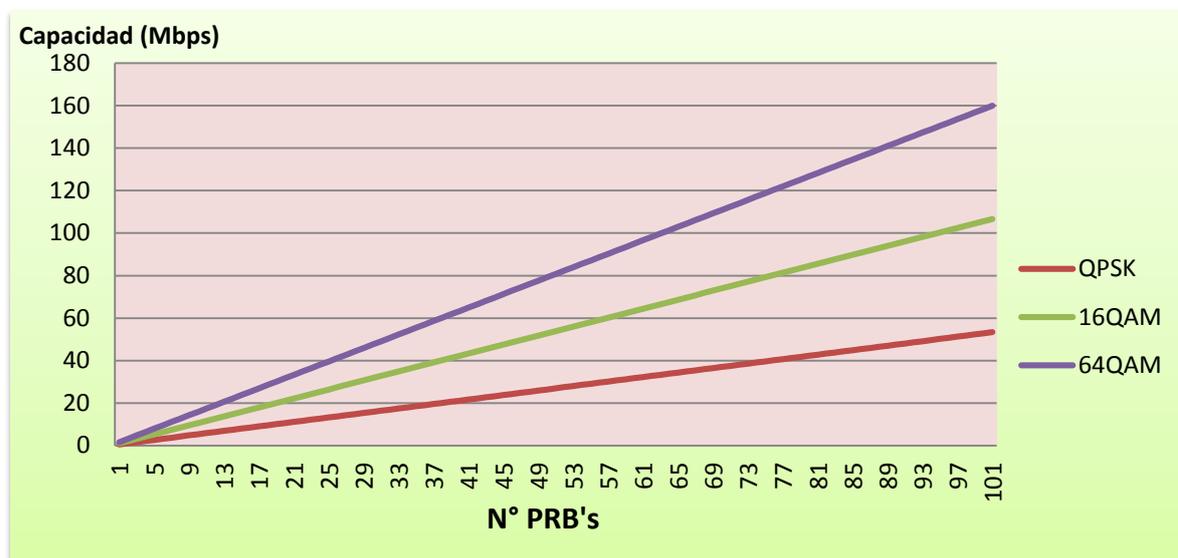


Figura 4.5 Capacidad según la asignación de PRBs y modulación [Elaboración propia]

En nuestro planeamiento no se trabajara con la máxima capacidad que puede ofrecer el eNB, se aplicara un factor de utilización igual al 85% de uso que permitirá obtener lo que denominaremos capacidad útil del eNB. Por lo tanto nuestra capacidad útil será igual a 50.7536 Mbps.

4.4 CAPACIDAD REQUERIDA POR LOS USUARIOS

Hasta este punto se han realizado cálculos para conocer cuáles son las características del servicio que ofrece la red (cobertura y capacidad). En esta unidad se analizará cual es la demanda de servicios y capacidad de los usuarios para lo cual es necesario cierta información proveniente de los estudios de mercado.

El escenario planteado para nuestra red prestará servicios de voz y servicio de datos, tanto a usuarios individuales como a corporativos. La información de mercado nos da la cantidad y el perfil de cada tipo de usuarios, y se quiere calcular la capacidad que debe tener un eNB para cursar el tráfico ofrecido.

4.4.1 TIPO DE SERVICIOS

En este punto se determinará la calidad de servicio que se ofrecerá a los usuarios de esta tecnología, con la finalidad de cubrir la demanda que actualmente se tiene en Trujillo.

Como se mencionó en el Capítulo 3, los servicios a ofrecer serán:

- _ VoIP.
- _ Internet.

Para ambos casos se utilizaron diferentes modelos que nos permitan calcular la tasa de transmisión que se ofrecerá.

A. VoIP

Este servicio se refiere a la transmisión de voz paquetizada cuyos paquetes usan el protocolo IP en la capa 3. Para paquetizar la voz y enviarla usando IP se deben realizar una serie de procesos, tales como la codificación y transporte en una red IP.

La codificación de la voz consiste en transformar la voz analógica en paquetes de voz por medio de un CODEC para luego enviarla a las capas inferiores, este proceso se puede observar en la Figura 4.6. Existe una gran cantidad de técnicas de codificación con diferentes requerimientos en cuanto a tasa de bits (G.711, G.722, G.722.1, G723.1, G728, G729 y AMR).

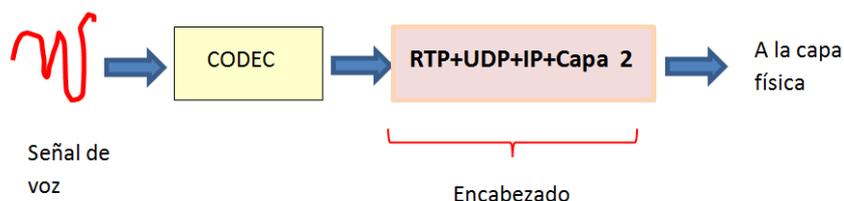


Figura. 4.6 Codificación de la VoIP [20]

La tasa de transmisión del CODEC depende de cada tipo. El encabezado de IP

depende si es IPv4 o IPv6, y la capa 2 depende de cada tecnología.

Uno de los CODEC más usados en tecnologías inalámbricas es el CODEC AMR, el cual esta estandarizado por el 3GPP. AMR ofrece una amplio rango de bit rates que va desde 4.75 Kbps hasta 12.2 Kbps, incorpora un sistema de detección de voz y un generador de ruido confort para reducir la cantidad de bits enviados durante los periodos de silencio.

En nuestra planificación se usará un CODEC de voz del tipo AMR Full Rate (12.2 Kbps) con detección de silencio y la capa 3 usará IPv6.

B. INTERNET

Los modelos de tráfico de internet no suministran información sobre la tasa de bits que necesitan las diferentes aplicaciones con las que se cuenta, en especial http. Los operadores hacen un estimado sobre la tasa de bits con la cual se espera que los usuarios estén satisfechos. En nuestra planificación se asignara una tasa de 512 Kbps para usuarios individuales mientras que para empresas se otorgaran tasas de 2 Mbps para las de mayores demandas y 1 Mbps para las otras.

4.4.2 CAPACIDAD DEL SERVICIO VoIP

Los servicios ofrecidos a clientes individuales serán los de VoIP e Internet. A continuación, se realiza la estimación de la tasa de bits necesaria para llevar a cabo una conversación VoIP, la tasa de internet será asignada en base a información de mercado.

La tasa bits promedio en VoIP está definida por la Ecuación 4.17 [20]:

$$R_{VoIP} = \frac{R_{VoZ} \times T_{voZ} + R_{Confort} \times T_{confort}}{T_{ON} + T_{OFF}} \quad (4.17)$$

Donde:

- _ R_{VoIP} : Tasa de bits promedio en VoIP.
- _ R_{VoZ} : Tasa de bits de voz.
- _ T_{voZ} : Tiempo de voz.
- _ $R_{Confort}$: Tasa de confort o silencio.
- _ $T_{confort}$: Tiempo de confort o silencio.
- _ T_{ON} : Periodo de actividad de voz.
- _ T_{OFF} : Periodo de silencio.

La tasa de bits de voz y confort están definidas en función a la cantidad de bits de cada trama.

La tasa de bits de voz es calculada en base a los bits provenientes de los aportes de bits

de: la trama de voz CODEC, la cabecera AMR, la capa 3, la capa 2 y la capa 1. Los bits de la trama de voz CODEC varían según el modo que sea seleccionado, para el CODEC AMR Full Rate se consideran 244 bits. Los bits de cabecera, en general para el CODEC AMR, son 19. En la capa 2 tenemos: 96 bits por el protocolo RTP, 64 bits por el protocolo UDP y 160 bits por el protocolo IPv4 o 320 bits por el protocolo IPv6. En LTE los bits de capa 3 soportan un método de compresión denominado ROHC, el cual permite un factor de compresión de 10 a 1. La capa 2 según lo detallado en el capítulo 2 está formado por 3 subcapas las cuales aportan con: 8 o 16 bits en PDCP, 8 o 16 bits en RLC y 8, 16 o 24 bits en MAC. La capa 1, o capa física, está formada por 16 bits.

En Tabla 4.20 se indican la cantidad de bits que serán considerados para nuestra planificación (se considera el peor caso, es decir, mayor cantidad de bits en la cabecera).

Parámetro		Cantidad de bits	Cantidad de bits con compresión
CODEC AMR	Trama de voz	244	244
	Cabecera	19	19
Capa 3	RTP	96	48
	UDP	64	
	IPv6	320	
Capa 2	PDCP	16	16
	RLC	16	16
	MAC	24	24
Capa 1	CRC	16	16
Total		815	383

Tabla 4.20 Cantidad de bits en la trama de voz CODEC [Elaboración propia]

Todos los recursos para llevar tramas de voz usando CODEC AMR deben ser transportados en 20 ms. Por lo tanto la R_{voz} queda definida por la Ecuación 4.18 [20].

$$R_{voz} = \frac{\text{Total de bits de voz}}{20 \text{ ms}} \quad (4.18)$$

Remplazando en la ecuación 4.18 con lo obtenido en la Tabla 4.20, tenemos:

$$R_{voz} = \frac{383 \text{ bits}}{20 \text{ ms}} = 19.15 \text{ Kbps} \quad (4.19)$$

El cálculo de la cantidad bits de confort, a diferencia de los bits de voz, considera 39 bits en la trama de voz y se envían cada 160 ms, lo cual es consecuencia de su sistema de actividad de voz y generador de ruido de confort para reducir la cantidad de bits enviados durante los periodos de silencio. Por lo que, su tasa de bits es:

$$R_{Confort} = \frac{178 \text{ bits}}{160 \text{ ms}} = 1.1125 \text{ Kbps} \quad (4.20)$$

Ahora solo falta conocer los valores de T_{Voz} , $T_{Confort}$, T_{ON} y T_{OFF} para poder obtener la tasa de bits promedio. Para el cálculo de estos parámetros se toman resultados de un experimento [20], el cual consistió en analizar 10 conversaciones cada una de 15 minutos de duración, obteniéndose en promedio:

- _ Periodos de activación de voz: $T_{ON} = 1026 \text{ ms}$.
- _ Periodos de silencio: $T_{OFF} = 1171 \text{ ms}$.

En AMR aunque el sistema de detección de voz detecta la no actividad de voz se envían 7 tramas de hangover; así que para calcular el tiempo de voz se le debe suma 140 ms al T_{ON} . De igual manera, al tiempo de silencio se debe restar el tiempo de hangover. Entonces:

$$T_{Voz} = T_{On} + 140\text{ms} = 1166 \text{ ms} \quad (4.21)$$

$$T_{Confort} = T_{OFF} - 140\text{ms} = 1031 \text{ ms} \quad (4.22)$$

Remplazando los valores obtenidos en las Ecuaciones 4.19, 4.21, 4.21 y 4.22 en 4.17, obtenemos:

$$R_{VoIP} = \frac{19.15 \times 1166 + 1.1125 \times 1031}{1026 + 1171} = 10.6854 \text{ Kbps} \quad (4.23)$$

4.5 CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE ESTACIONES BASE

La experiencia nos ha demostrado que en Ingeniería de Telecomunicaciones no es necesario implementar una red al 100%, para ello existe una etapa post planificación, llamada optimización de red. Por tal motivo, el diseño inicial solo considera la primera fase como se describió en el Capítulo 3.

En un principio se tomará en cuenta la población con mayor poder adquisitivo y el sector empresarial. Para que en una segunda fase una vez recuperada la inversión se

proceda a incrementar la cobertura permitiendo el acceso al servicio a toda la población. Una fase final será el brindar nuevos servicios y dar mayor calidad.

Se debe tener en cuenta que como fase inicial se ha considerado una proyección de incremento de clientes hasta dentro de 4 años. En la Tabla 4.21 se detalla los incrementos de clientes según el tipo de servicio durante este periodo.

Servicio	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
Internet	30.00%	50.00%	70.00%	80.00%
VoIP	30.00%	50.00%	70.00%	80.00%
PYME Regular	5.00%	10.00%	13.00%	15.00%
Pyme Premium	1.00%	2.50%	4.00%	5.00%

Tabla 4.21 Porcentaje de clientes según servicios y año [Elaboración propia]

Además, por tratarse de una fase inicial, se ofrecerán servicios con tasas relativamente bajas. En la Tabla 4.22 se muestra el número de clientes proyectados para el Año 4.

Servicio	Tasa (Kbps)	Factor de reventa	Cientes Año 4
Internet	512	40	5043
VoIP	10.6854	1	5043
PYME Regular	1000	1	946
PYME Premiun	2000	1	315
Total	NA	NA	11347

Tabla 4.22 Detalle de servicios a prestar por la red [Elaboración propia]

Se debe calcular la capacidad total demanda por los clientes, según se detalla en la Ecuación 4.24.

$$C_{Tot_Dem} = C_{Int} + C_{VoIP} + C_{PYME\ Regular} + C_{PYME\ Premium} \quad (4.24)$$

Donde:

- _ C_{Tot_Dem} : Capacidad total demandada.
- _ C_{Int} : Capacidad ofrecida a los usuarios individuales de Internet.
- _ C_{VoIP} : Capacidad ofrecida a los usuarios individuales de VoIP.

- _ $C_{PYME_Regular}$: Capacidad ofrecida a los usuarios PYME Regulares de Internet.
- _ $C_{PYME_Premium}$: Capacidad ofrecida a los usuarios PYME Premium de Internet.

Desde el punto de vista económico todo operador revende sus servicios, es decir, que la cantidad de usuarios a los que vende sus servicios es mayor a la cantidad de usuarios que su red puede atender de manera simultánea. Para los servicios de Internet no existe una metodología establecida que nos permita determinar un valor fijo de reventa, los operadores lo van monitoreando y ajustando a la capacidad de la red, manteniendo parámetros de calidad de servicio. En cambio, el servicio de voz se maneja con otra perspectiva.

Para el servicio de Internet (individual), se tendrá como máximo 5 043 clientes, por lo tanto la cantidad de concurrentes será de 127 clientes (factor de reventa igual a 40). Si a cada usuario se le debe garantizar 512 Kbps, entonces el servicio de acceso a Internet individual demanda una capacidad total:

$$\begin{aligned} C_{Int} &= 512 \text{ kbps} \times 127 \\ &= 65,024 \text{ Mbps} \end{aligned} \quad (4.25)$$

En el caso del servicio de VoIP se aplica un criterio de factor de reventa diferente al del servicio de Internet, debido a que en VoIP se debe mantener una calidad de servicio por ser en tiempo real y sensible a los retardos.

En nuestra planificación se busca tener la misma calidad de servicio que la PSTN, por lo cual se usará la misma metodología. Para ello se consideran llamadas de 3.5 minutos de duración promedio, el cual será expresado en Erlang [20].

$$\text{Duracion promedio de una llamada} = \frac{3.5}{60} = 0.0583 \text{ Erlang}$$

Este valor obtenido representa el tráfico ofrecido a cada cliente.

Para el cálculo del tráfico que puede soportar la red en VoIP se usará el modelo Erlang B, el cual tiene entre sus principales premisas:

- _ La cantidad de usuarios es muy grande.
- _ Las llamadas llegan en forma aleatoria de acuerdo a una distribución de Poisson.
- _ Las llamadas se atienden según el orden de llegada.
- _ Las llamadas bloqueadas se pierden.

_ El tiempo de duración de las llamadas sigue una distribución exponencial.

Este servicio deberá contar con 5 043 clientes, por lo tanto calcularemos el tráfico total que tendrá que ofrecer la red, manteniendo un grado de calidad. El tráfico total ofrecido será calculado con la Ecuación 4.26.

$$T_{Total} = U_{Ind_VoIP} \times T_{Ind} \quad (4.26)$$

Donde:

- _ T_{Total} : Tráfico total ofrecido por la red.
- _ T_{Ind} : Tráfico ofrecido a cada cliente individual. En nuestro caso es 0.0583 Erlang.

Por lo tanto:

$$T_{total} = 5\,043 \times 0.0583 = 264.0069 \text{ Erlang}$$

Con el uso de una calculadora de Erlang B realizaremos el cálculo de la cantidad de líneas necesarias para soportar el tráfico requerido por los clientes. En la Figura 4.7 se muestra los cálculos realizados con la calculadora de Erlang B.

Se puede apreciar que considerando una probabilidad de bloqueo del 1% y un tráfico de 294 Erlangs se necesitara contar con 318 líneas. La capacidad del servicio de VoIP es calculada con la Ecuación 4.23:

$$C_{VoIP} = \# \text{ líneas} \times T_{Ind} \quad (4.27)$$

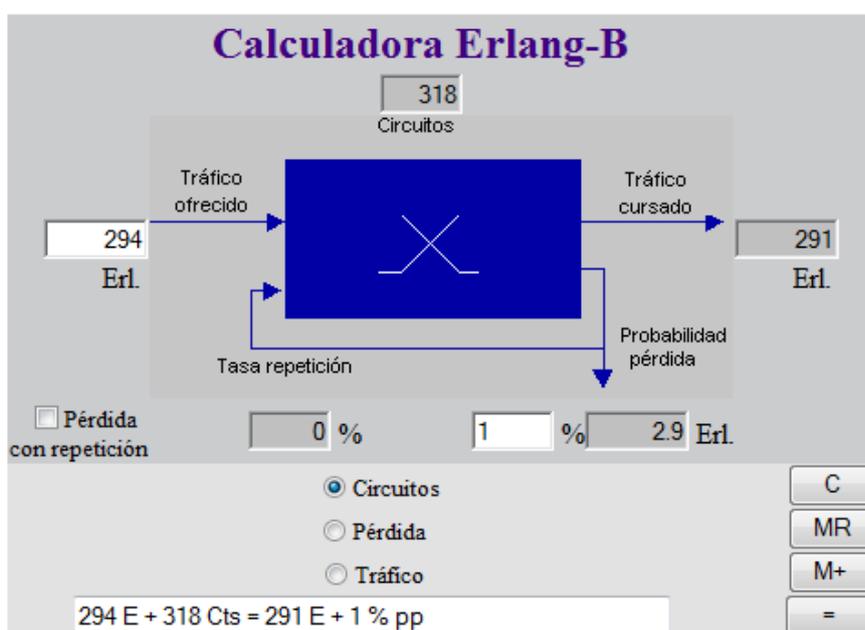


Figura 4.7 Cálculo de líneas para el servicio de VoIP usando la calculadora de Erlang [21]

Considerando los valores obtenidos con la calculadora de Erlang B y que cada línea consume 10.6854 Kbps (CODEC AMR Full Rate 12.2 Kbps) tenemos:

$$\begin{aligned} C_{Ind_VoIP} &= 318 \times 10.6854 \\ C_{Ind_VoIP} &= 3.398 \text{ Mbps} \end{aligned} \quad (4.28)$$

A los servicios PYMEs se les debe garantizar una calidad de servicio por lo que no se les aplica factor de reventa. Las capacidades requeridas serán:

$$C_{PYME_Regular} = 1024 \times 946 = 968.704 \text{ Mbps} \quad (4.29)$$

$$C_{PYME_Premium} = 2048 \times 315 = 645.12 \text{ Mbps} \quad (4.30)$$

A partir de los resultados de las Ecuaciones 4.25, 4.28, 4.29 y 4.30 se concluye que la capacidad real que será demandada por los clientes es la detallada en la Tabla 4.23.

Servicio	Capacidad
Internet	65.024
VoIP	3.3980
PYME Regular	968.704
PYME Premium	1032.192
Total	2069.31797

Tabla 4.23 Resumen de las capacidades demandadas por en la red [Elaboración propia]

Para poder realizar los cálculos de cantidad de estaciones bases necesarias para cubrir la demanda de capacidades calculada, debemos definir la densidad de datos, según la ecuación 4.31 [20]:

$$D_{Datos} = \frac{C_{Tot_Dem}}{A_{Total}} \quad (4.31)$$

Donde:

- _ D_{Datos} : Densidad de datos ($\frac{Mbps}{Km^2}$)
- _ A_{Total} : Área total a cubrir (Km^2)

Remplazando en la ecuación 4.31 con los valores obtenidos en la Tabla 4.23 y teniendo

en cuenta que el área total del distrito de Trujillo tiene un área de 39.36 Km² [16].

$$D_{\text{Datos}} = \frac{2069.31797}{39.36}$$

$$D_{\text{Datos}} = 52.5742 \frac{\text{Mbps}}{\text{Km}^2}$$

Conociendo el área de cobertura de cada sector podemos calcular la capacidad que debe tener cada una, según la ecuación 4.32.

$$C_{\text{Cel_Req}} = D_{\text{Datos}} \times A_{\text{Sector}} \quad (4.32)$$

Donde:

- _ $C_{\text{Cel_Req}}$: Capacidad requerida en la celda.
- _ A_{Sector} : Área del sector.

Remplazando datos obtenemos:

$$C_{\text{Cel_Req}} = 52.5742 \times 0.8913$$

$$C_{\text{Cel_Req}} = 46.8607 \text{ Mbps}$$

El valor obtenido representa la máxima capacidad requerida por los usuarios a la cual será sometido cada sector. En los cálculos realizados en el apartado 4.3.2 se obtuvo que la máxima capacidad útil que puede ofrecer cada eNB es de 54.7536 Mbps. Por lo cual se concluye que el eNB podrá soportar la demanda de capacidad de los clientes.

En caso de que el eNB no hubiese podido soportar la demanda de capacidad, este inconveniente se podría superar de las siguientes maneras:

- _ Disminuir la potencia de transmisión en el enlace de subida con el objetivo de disminuir el área de cobertura del eNB.
- _ Habilitar otra portadora

La cantidad de sectores, N_{sectores} , se obtiene dividiendo el área a cubrir entre el área de cobertura de cada sector del eNB.

$$N_{\text{sectores}} = \frac{A_{\text{Total}}}{A_{\text{Sector}}} \quad (4.32)$$

Remplazando obtenemos:

$$N_{\text{sectores}} = \frac{39.36}{0.8913}$$

$$N_{Sectores} \cong 45$$

En nuestro caso obtenemos 45 sectores, pero en nuestro diseño se ha considerado que cada celda cuenta con 3 sectores, entonces se necesitan 15 estaciones base.

La separación mínima entre estaciones se calcula con la Ecuación 4.33:

$$S_{eNb} = R\sqrt{3} \quad (4.33)$$

Se sabe que el radio de cobertura es de 1.0145 Km.

$$S_{eNb} = 1.0145\sqrt{3}$$

$$S_{eNb} = 1.7571 \text{ Km}$$

4.6 RED DE ACCESO

En el apartado 4.3 se determinó que para poder establecer una cobertura total en el distrito de Trujillo se necesitará instalar 15 eNBs. Por temas económicos todo proyecto se trabaja en fases. Este proyecto se establecerá en 3 fases, según:

- _ Fase inicial, en donde se instalaran los primeros eNB.
- _ Fase intermedia, ampliación de la cobertura.
- _ Fase final, optimización de la red.

El criterio para ubicar las estaciones será tomado en base al tráfico que actualmente presenta cada uno de los NBs instalado por la empresa Claro en el distrito de Trujillo.



Figura 4.8 Ubicación de los NBs instalados por Claro en el distrito de Trujillo.

[Elaboración propia]

N°	Site	Capacidad Promedio (Mbps)	Capacidad Máxima (Mbps)
1	El Cortijo	12.304	18.064
2	Hermilio Valdizan	12.124	17.668
3	Miguel Grau	11.597	17.527
4	San Andrés	11.019	16.139
5	Pablo Casal	9.889	15.48
6	Santa Sofía	10.494	15.289
7	Daniel Carrión	11.752	15.232
8	Da Silva	7.953	14.873
9	Caqueta	7.845	14.644
10	Monserate	9.946	14.373
11	Trupal	7.343	13.948
12	Panamericana	6.336	12.714
13	Bolognesi	6.133	12.691
14	Pay Pay	7.741	12.612
15	Hospital Lazarte	8.053	12.195
16	Mansiche	6.954	12.023
17	Av. Pesqueda	5.809	11.713
18	Jesus de Nazareth	6.444	11.545
19	26 de Marzo	5.167	11.275
20	El Bosque	5.548	10.443
21	Trujillo Centro	5.657	10.093
22	Galerías	6.916	7.616
23	Costa Rica	5.796	7.616
24	Villanueva	7.198	7.616

Tabla 4.24 Capacidades de los NBs instalados por Claro en el distrito de Trujillo [22]

Otro criterio a tomar será la ubicación de la estaciones de mayor envergadura, por los equipos instalados, en la zona. Por ejemplo debemos considerar aquellos lugares donde se hayan instalado los equipos del Core, tanto para 2G y 3G.

En la Figura 4.8 se muestra la ubicación geográfica de los mencionados nodos, de donde se puede observar la mayoría de los NB están instalados en el centro del distrito. Además, en la Tabla 4.24 se detallan las capacidades actuales de los mencionados NBs.

En base a la información descrita de la empresa América Móvil se realizará la ubicación de los eNBs. Es importante señalar que debido a la experiencia en el campo de la planificación de redes celulares la cobertura de cada eNB será dividida en 3 sectores. Esta configuración ha mostrado un gran rendimiento y ha sido establecida por los programas que usan los operadores para el diseño de sus celdas las cuales llevadas a la práctica han arrojado factores de carga de celda muy cercanos a los teóricos tanto en escenario rural y urbano.

El presente diseño se centrará en la fase inicial, en donde se instalarán solo 7 eNBs.

En la Figura 4.9 se puede observar la ubicación y cobertura de cada una de los eNBs.

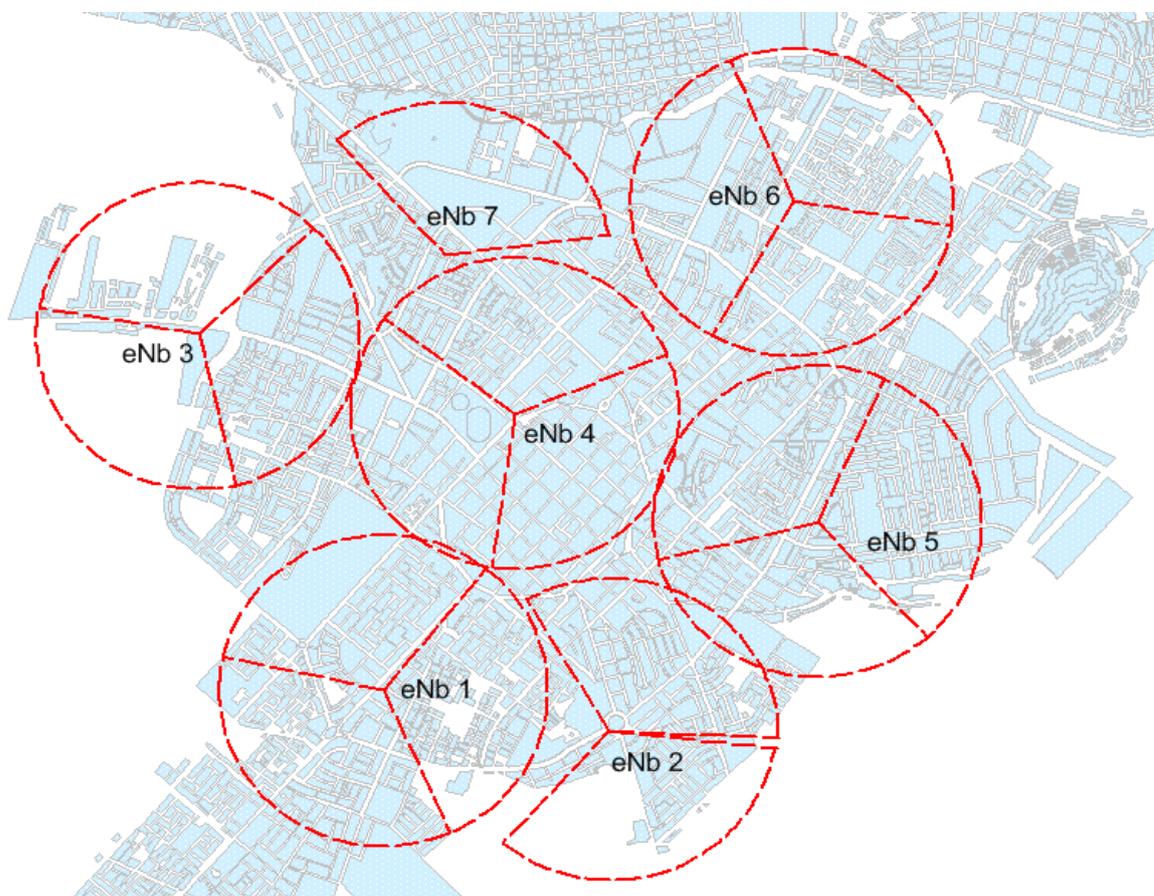


Figura 4.9 Ubicación y cobertura de cada eNB [Elaboración propia]

En la Tabla 4.25 se detalla la ubicación geográfica y número de sectores de cada eNB.

Estación Base	Longitud (Oeste)	Latitud (Sur)	N° Sectores
eNB 1	79°2'10.67"	8°7'19.55"	3
eNB 2	79°1'24.96"	8°7'27.83"	2
eNB 3	79°2'47.75"	8°6'4.68"	3
eNB 4	79°1'44.03"	8°6'20.88"	3
eNB 5	79°0'41.76"	8°6'46.43"	3
eNB 6	79°0'51.48"	8°5'30.47"	1
eNB 7	79°1'58.07"	8°5'47.76"	3

Tabla 4.25 Ubicación geográfica de los eNBs [Elaboración propia]

Se debe garantizar que cada uno de los nodos posea una línea de vista lo suficientemente buena para realizar una buena distribución de la señal a los usuarios y además permita la implementar los microondas necesarios para la Red de Transporte. Para esto, se hizo una visita a la ciudad de Trujillo, en donde se realizó un estudio de campo y se tomaron los siguientes datos para la instalación de los sectores en cada eNB.

➤ **eNB 1:**

Es el nodo principal de nuestra red puesto que representa el punto de acceso a la red Core que actualmente está implementada en la zona por la empresa América Móvil. Se encuentra ubicada en la Av. Larco. Tiene como objetivo cubrir zona del sur. Se usará una torre cuadrangular auto soportada de 40 m y su sectorización es detallada en la Tabla 4.26.

Sector	Azimut
1	90°
2	210°
3	330

Tabla 4.26 Resumen de la cobertura del eNB 1

➤ **eNB 2:**

Se encuentra ubicado en la Av. La Marina – Urbanización La Perla. Tiene como objetivo cubrir zona del sur oeste. Se usará una torre monopolo de 30 m y su sectorización es detallada en la Tabla 4.27.

Sector	Azimut
1	30°
2	150°

Tabla 4.27 Resumen de la cobertura del eNB 2

➤ **eNB 3:**

Se encuentra ubicado en la Av. Mansiche. Tiene como objetivo cubrir zona oeste, donde se encuentra ubicado el centro comercial Saga Falabella. Se usará una torre monopolo de 30 m y su sectorización es detallada en la Tabla 4.28.

Sector	Azimut
1	100°
2	220°
3	340

Tabla 4.28 Resumen de la cobertura del eNB 3

➤ **eNB 4:**

Se encuentra ubicado en la Av. España. Tiene como objetivo cubrir zona central donde se encuentra ubicado el estadio de la ciudad. Se usará una torre triangular auto-soportada de 20 m y su sectorización es detallada en la Tabla 4.29.

Sector	Azimut
1	10°
2	130°
3	250

Tabla 4.29 Resumen de la cobertura del eNB 4

➤ **eNB 5:**

Se encuentra ubicado en la Av. América Sur. Tiene como objetivo cubrir zona oeste. Se usará un monopolo de 30 m y su sectorización es detallada en la Tabla 4.30.

Sector	Azimut
1	100°
2	220°
3	340

Tabla 4.30 Resumen de la cobertura del eNB 5

➤ **eNB 6:**

Se encuentra ubicado en la urbanización Los Naranjos. Tiene como objetivo cubrir zona norte. Se usará un mástil de 6 m y su sectorización es detallada en la Tabla 4.31.

Sector	Azimut
1	30°
2	150°
3	270

Tabla 4.31 Resumen de la cobertura del eNB 6

➤ **eNB 7:**

Se encuentra ubicado en la urbanización La Primavera. Tiene como objetivo cubrir zona norte. Se usará monopolo de 20 m y su sectorización es detallada en la Tabla 4.32

Sector	Azimut
1	0°

Tabla 4.32 Resumen de la cobertura del eNB 7

4.7 RED DE TRANSPORTE

En cuanto a la red de transporte, nuestra red LTE es una tecnología que requiere altas capacidades de transmisión. En una red de transmisión tenemos dos opciones típicas: el uso de microondas o fibra óptica.

Nuestro diseño de red de transporte estará basado en el uso exclusivo de enlaces de microondas entre las estaciones. Estos enlaces tendrán las siguientes características:

- _ Enlaces de 300 Mbps de capacidad.
- _ Configuración 1+1.
- _ Topología de estrella.
- _ Se usará la banda de 23 GHz.
- _ Canalización con BW=56 MHz

Los equipos de Microondas a usarse serán los MPT 9500 Rel. 3.0.0 Microwave Packet Radio del proveedor Alcatel Lucent, cuyas principales especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 4.33. Estos equipos son los que actualmente la empresa América Móvil Perú está usando para la expansión de su red a nivel nacional.

Característica	Valor
Banda	23 GHz
Frecuencia	21.2 - 23.6 GHz
Modulación	256 QAM (Adaptativa)
Ancho de Banda	56 MHz
Potencia máxima	17 dBm
Sensibilidad (10^{-6})	-65.5 dBm

Tabla 4.33 Especificaciones técnicas del microondas [23]

La canalización que utilizaremos será la de la banda de 23 GHz con un BW igual a 56 MHz. Esta asignación de frecuencias es regularizada por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones mediante un Plan Nacional de Asignación de Frecuencias (PNAF). En la Tabla 4.34 se indican las canales que tenemos disponibles.

Ahora que ya se mencionaron las premisas del diseño de la Red de Transporte procederemos a detallar los cálculos de propagación y garantizar las líneas de vista para cada enlace propuesto. En la Figura 4.10 se muestra de manera general la topología de la red.

Banda 21 200 – 23 600 MHz (Servicio fijo utilizando radioenlaces digitales)

Canal N°	Frecuencia (MHz) BW: 28 MHz		Canal N°	Frecuencia (MHz) BW: 28 MHz	
	Ida	Retorno		Ida	Retorno
1	21 238	22 470	21	21 798	23 030
2	21 266	22 498	22	21 826	23 058
3	21 294	22 526	23	21 854	23 086
4	21 322	22 554	24	21 882	23 114
5	21 350	22 582	25	21 910	23 142
6	21 378	22 610	26	21 938	23 170
7	21 406	22 638	27	21 966	23 198
8	21 434	22 666	28	21 994	23 226
9	21 462	22 694	29	22 022	23 254
10	21 490	22 722	30	22 050	23 282
11	21 518	22 750	31	22 078	23 310
12	21 546	22 778	32	22 106	23 338
13	21 574	22 806	33	22 134	23 366
14	21 602	22 834	34	22 162	23 394
15	21 630	22 862	35	22 190	23 422
16	21 658	22 890	36	22 218	23 450
17	21 686	22 918	37	22 246	23 478
18	21 714	22 946	38	22 274	23 506
19	21 742	22 974	39	22 302	23 534
20	21 770	23 002	40	22 330	23 562

Tabla 4.34 Canalizado de frecuencias en banda de 23 GHz [24]

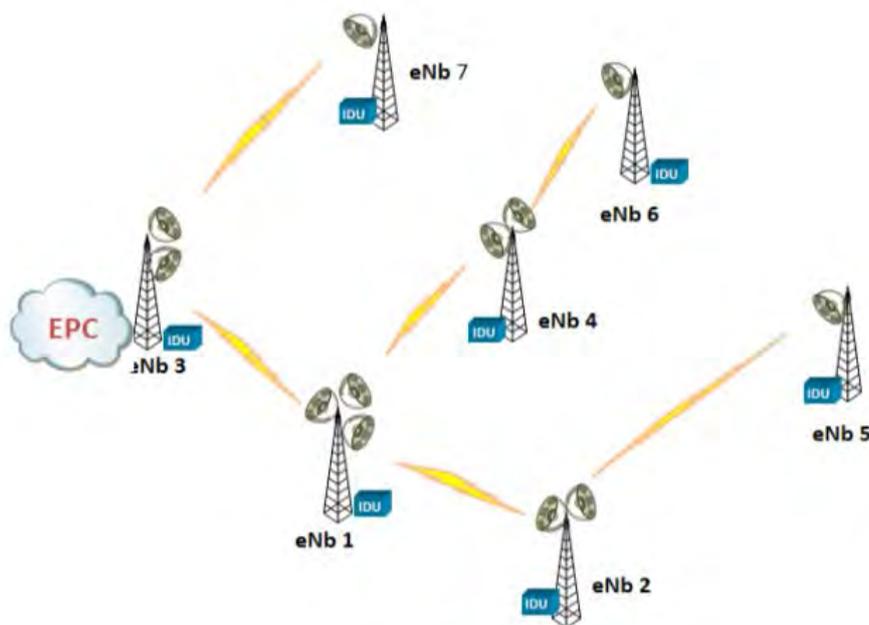


Figura 4.10 Topología de la red de Transporte [Elaboración propia]

En la Figura 4.10 se observa que se usará como estación principal al eNB 1, la razón por la cual se toma esta decisión es porque actualmente la empresa América Móvil usa esta estación como núcleo de la red en toda la zona norte del país.

En las Figuras 4.11 a 4.16 se muestran los perfiles realizados a cada uno de los enlaces de microondas, los cuales nos garantizan la línea de vista entre las estaciones involucradas. Estas simulaciones fueron realizadas con el programa Solaria, herramienta usada por la empresa América Móvil.

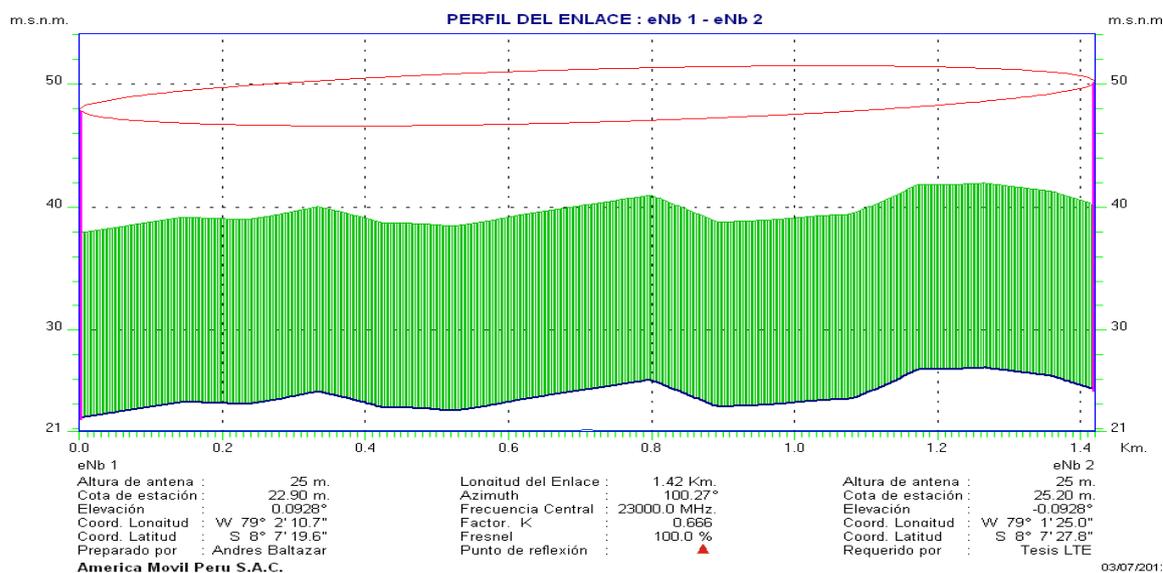


Figura 4.11 Perfil del enlace eNB 1 – eNB 2 [Elaboración propia]

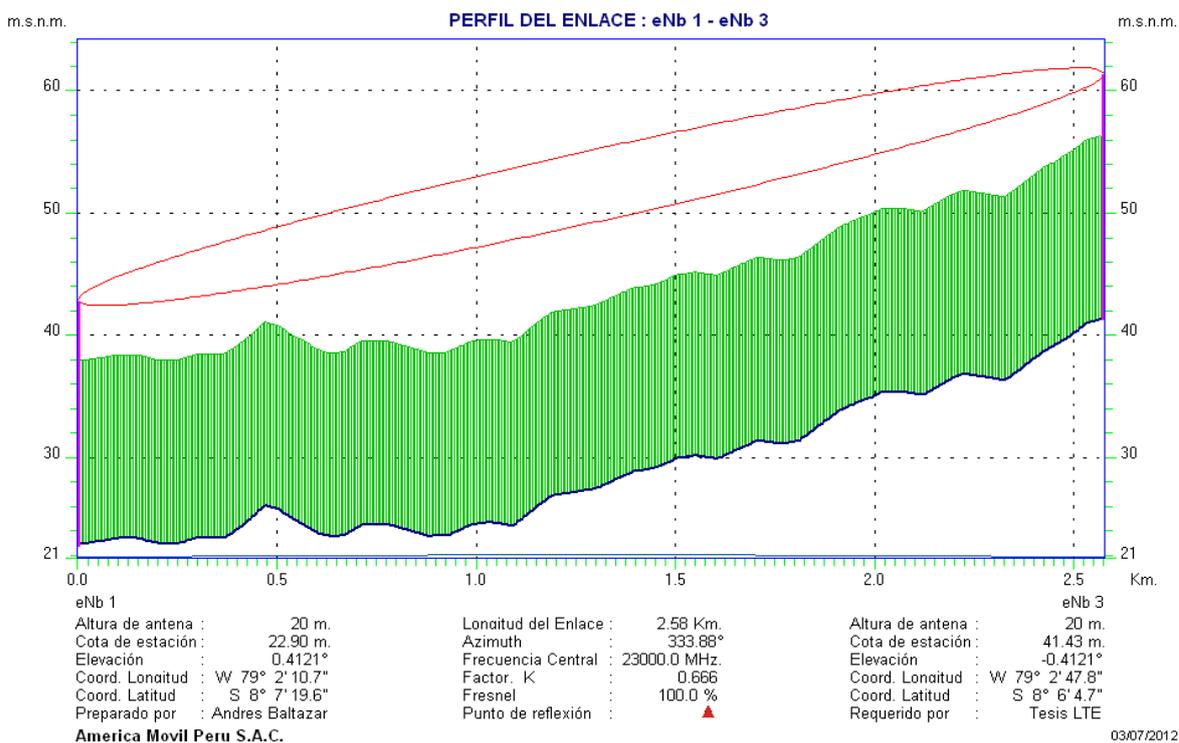


Figura 4.12 Perfil del enlace eNB 1 – eNB 3 [Elaboración propia]

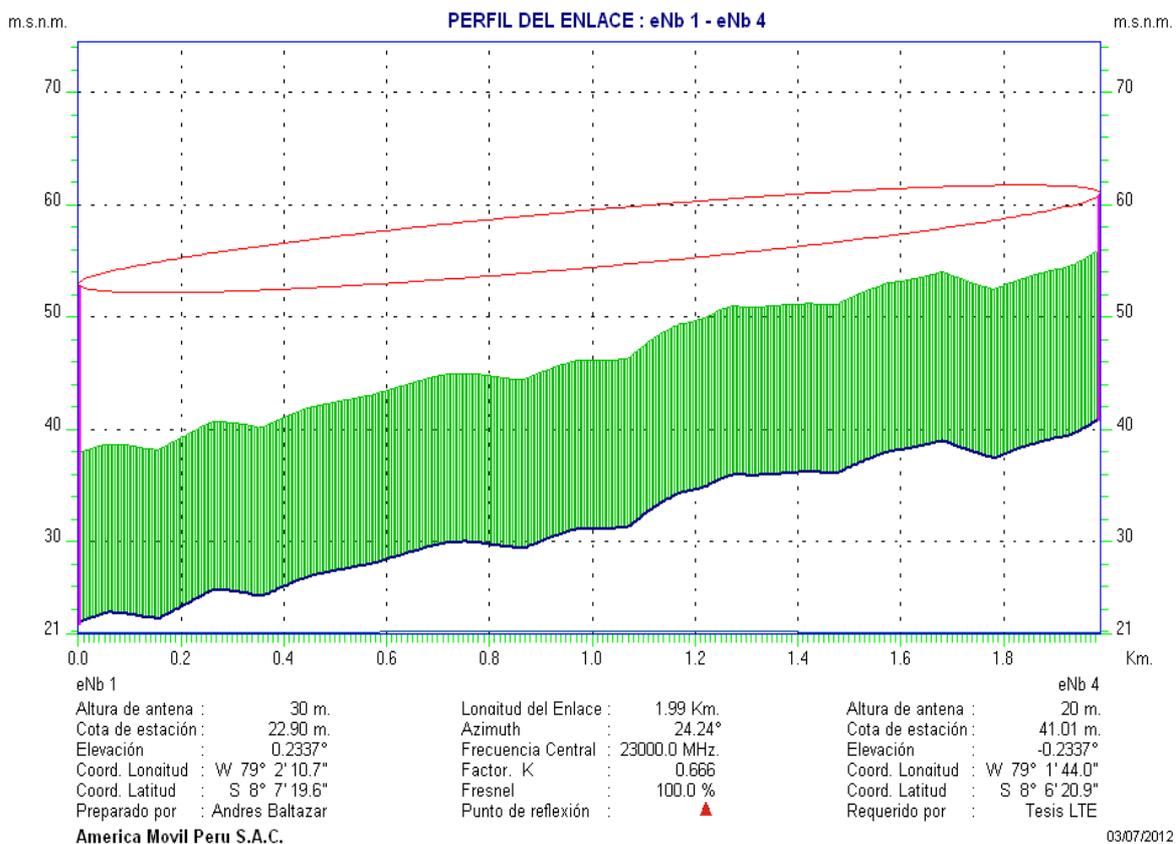


Figura 4.13 Perfil del enlace eNB 1 – eNB 4 [Elaboración propia]

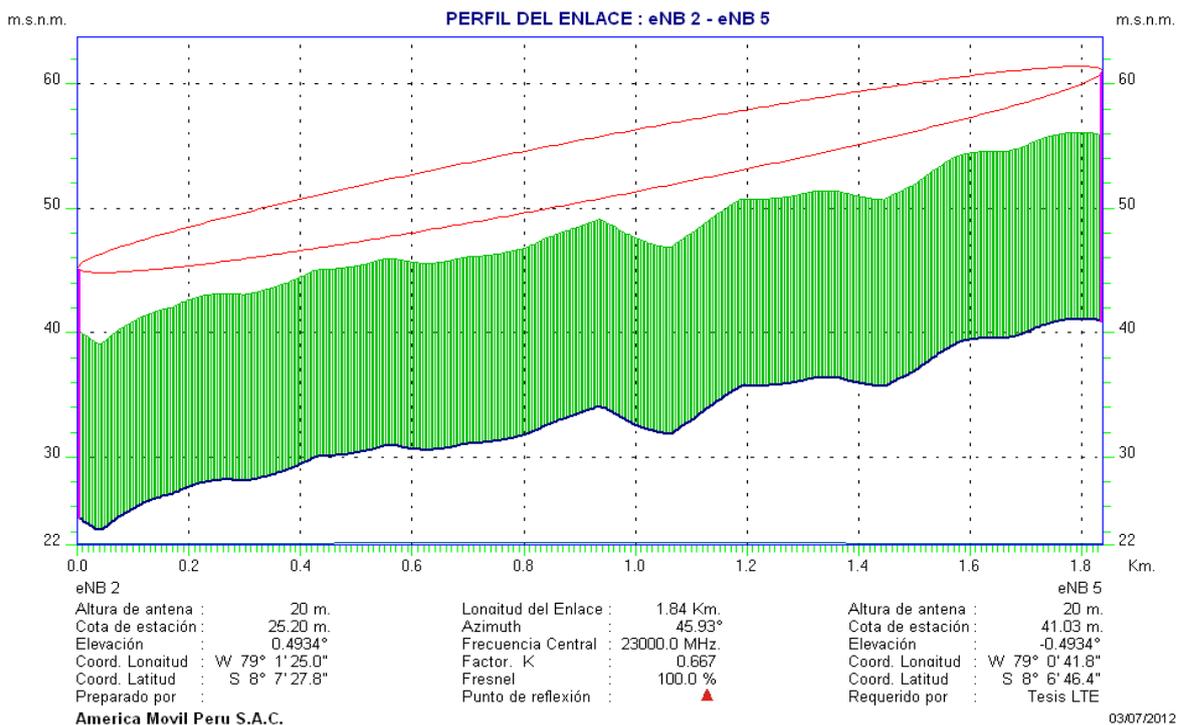


Figura 4.14 Perfil del enlace eNB 2 – eNB 5 [Elaboración propia]

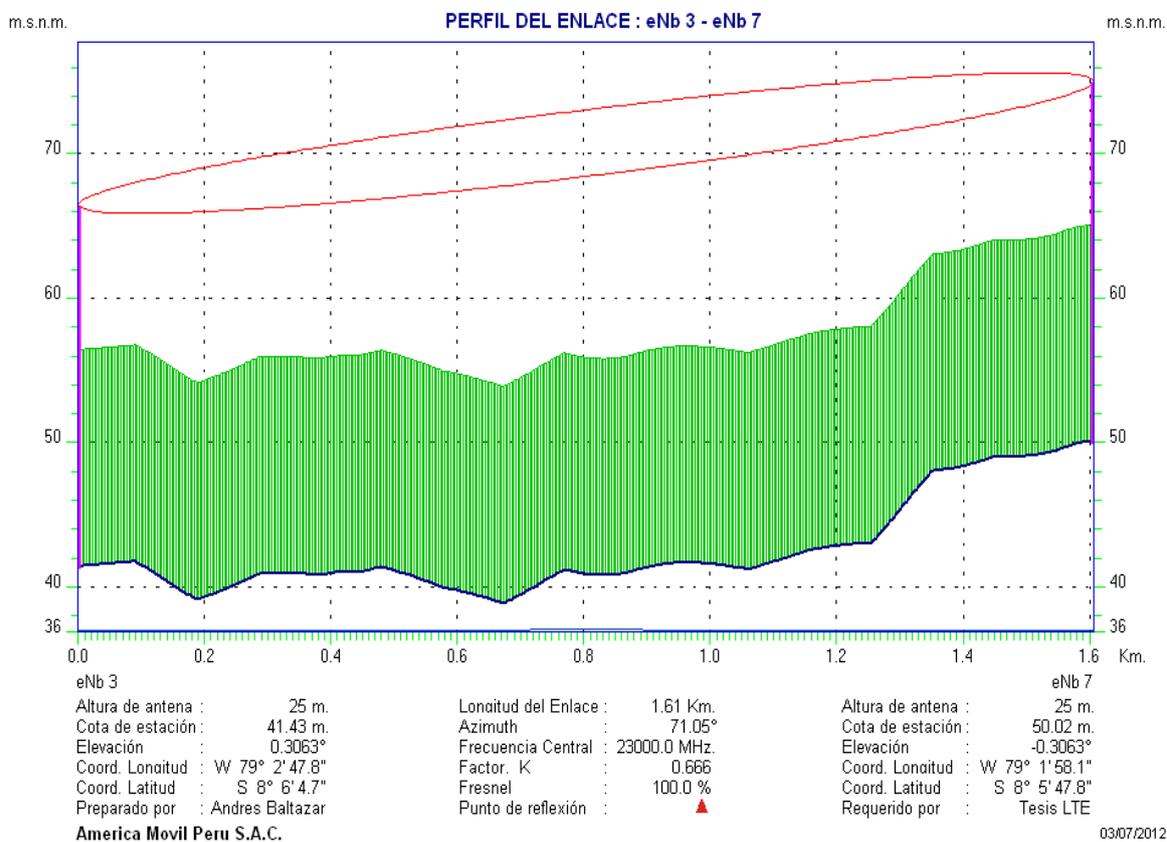


Figura 4.15 Perfil del enlace eNB 3 – eNB 7 [Elaboración propia]

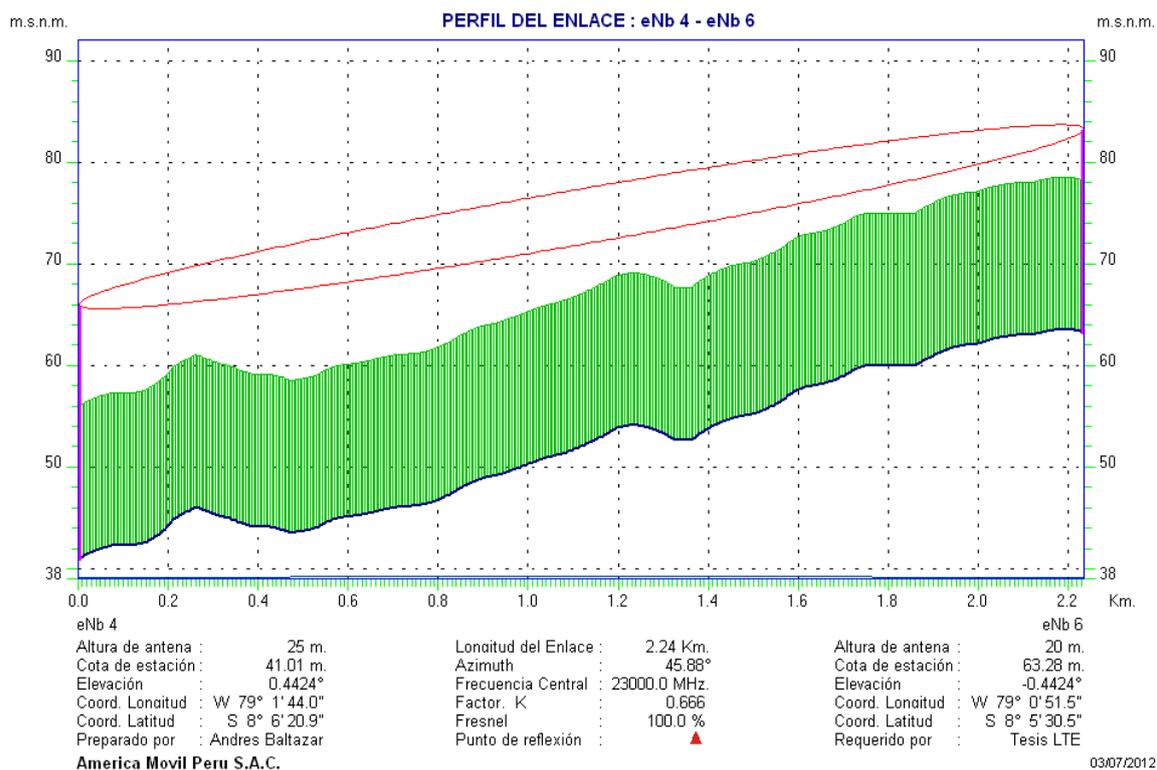


Figura 4.16 Perfil del enlace eNB 4 – eNB 6 [Elaboración propia]

Se debe tener en cuenta que en los perfiles simulados se ha garantizado el 100% de la primera Zona de Fresnel y el factor K igual a $\frac{2}{3}$.

A continuación se procederá a la selección de canales a usar en cada uno de los enlaces. En la Tabla 4.35 se señalan los canales a usar en cada enlace.

Enlace	Banda	Canal	Frecuencia Ida (MHz)	Frecuencia Vuelta (MHz)
eNB1 - eNB2	23	1	22 470	21 238
eNB1 - eNB3	23	7	22 638	21 406
eNB1 - eNB4	23	5	22 582	21 350
eNB2 - eNB5	23	3	21 294	22 526
eNB4 - eNB6	23	9	21 462	22 694
eNB3 - eNB7	23	11	21 518	22 750

Tabla 4.35 Asignación de canales [Elaboración propia]

En la Figura 4.17 se muestra los canales seleccionados y adicionalmente se indica que estación trabajará con la frecuencia alta y cual con la frecuencia baja.

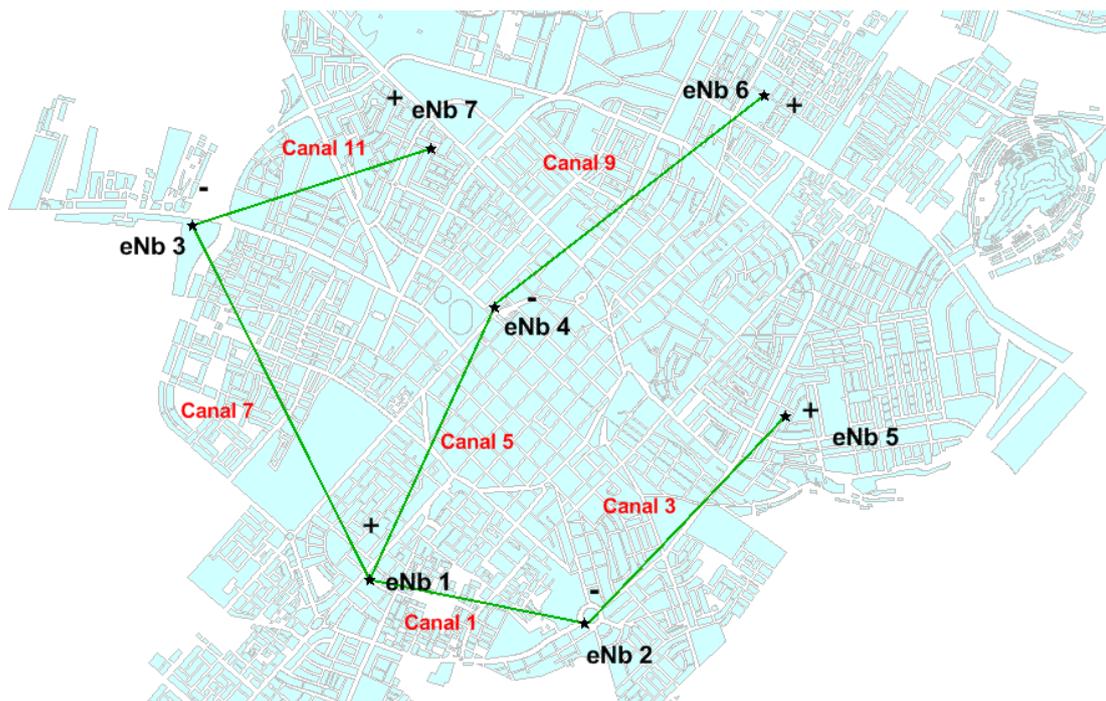


Figura 4.17 Plan de canalización de la Red de Transporte [Elaboración propia]

Una vez definida nuestra topología se procederá con los cálculos de las pérdidas de propagación para cada uno de los enlaces. En la Figura 4.18 se muestra el método de cálculo a usarse.

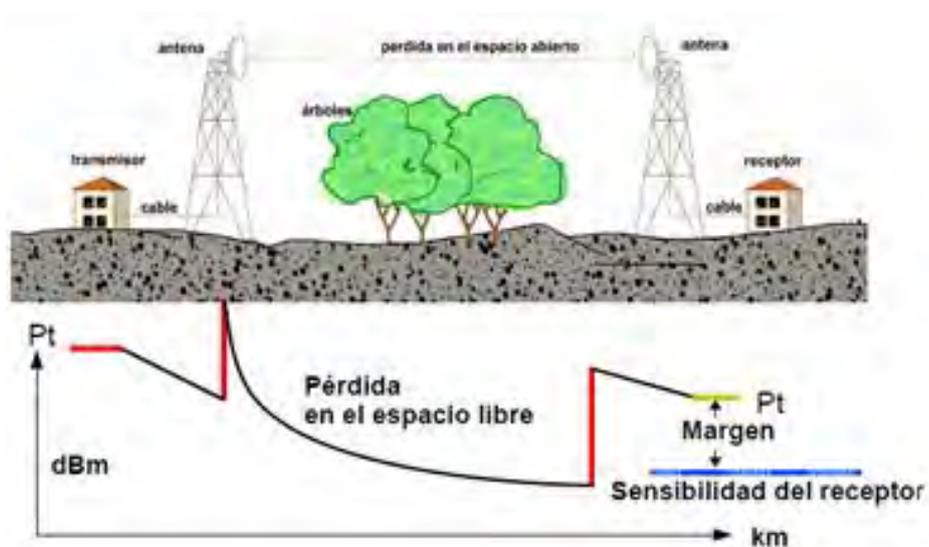


Figura 4.18 Pérdida de espacio libre

La potencia recibida por el receptor, cuando la propagación se da en espacio libre y en condiciones ideales, se puede calcular a partir de la fórmula de Friis:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - L_{Tx} - L_{Rx} - L_p \quad (4.34)$$

Donde:

- _ P_{Tx} : Potencia de transmisión.
- _ L_{Tx} y L_{Rx} : Pérdida de cables y conectores en transmisión y recepción.
- _ L_p : Pérdida por trayectoria en espacio libre
- _ G_{Tx} y G_{Rx} : Ganancia de antena recepción y transmisión.
- _ P_{Rx} : Potencia de recepción.

La pérdida de espacio libre, sin considerar efectos como absorción, difracción, reflexión, está definido por la Ecuación 4.35.

$$L_p = 32.4 + 20 \times \log f_c + 20 \times \log d \quad (4.35)$$

Donde:

- _ f_c : Frecuencia central (MHz)
- _ d : Distancia del enlace (Km)

Los cálculos de propagación serán realizados con una herramienta utilizada en el área de Sistemas de Transportes de la empresa América Móvil. En las Tablas 4.36, 4.37, 4.38, 4.38, 4.40 y 4.41 se muestran los cálculos para cada uno de los enlaces.

4.8 INTERCONEXIÓN CON REDES EXISTENTES

La convivencia de redes de acceso radio de diferentes tecnologías constituye una característica inherente a la propia evolución de los sistemas de comunicaciones móviles. Los operadores en nuestro país no son ajenos a esta realidad, estos nos ofrecen sus servicios a través de redes heterogéneas, por ejemplo, GSM, UMTS, y en un futuro, LTE.

Asociada a la existencia de redes heterogéneas aparece la necesidad de disponer de terminales multimodo, es decir, terminales que sean capaces de conectarse a la red mediante la utilización de varias tecnologías de acceso de radio. En este contexto, es importante destacar que la mayoría de terminales 3G/UMTS que hay actualmente en el mercado son a la vez terminales 2G/GSM, y, sin lugar a dudas, muchos de los futuros terminales LTE van a ser terminales multimodo que soporten algunas de las tecnologías actuales.

El sistema LTE ha sido específicamente diseñado para soportar despliegues de red donde la red de acceso E-UTRAN co-exista con otras redes de acceso radio, tal como se muestra en la Figura 4.19

HOP CONFIGURATION AND PERFORMANCE					
TOPOLOGY	eNb 1		eNb 2		Notes
LATITUDE	S 8°	7' 19.55"	S 8°	7' 27.83"	
LONGITUDE	W 79°	2' 10.67"	W 79°	1' 24.96"	
AZIMUTH	100°		280°		
ANTENNA TYPE	VHLP1-23AW1A		VHLP1-23AW1A		1x0.30 + 1x0.30
FREQUENCY TX	22.47000 GHz		21.23800 GHz		23 GHz
LINK TYPE	ALU MPR 23GHZ				
POLARIZATION	Vertical				
PROPAGATION AND AVAILABILITY CALCULATION					
EQUIPMENT	RF CENTRAL FREQUENCY			GHz	21.854
	TRANSMITTER POWER			dBm	16.00
	IF BANDWIDTH			MHz	56
LINK	LINK DISTANCE			Km	1.42
	FEEDER LENGTH AT A			m	0
	FEEDER LENGTH AT B			m	0
	FEEDER UNIT LOSS			dB/m	0
GAINS	ANTENNA GAIN AT A			dB	35.3
	ANTENNA GAIN AT B			dB	35.3
	TOTAL GAIN			dB	70.6
LOSSES	FREE SPACE			dB	122.24
	BY FLAT SURFACE			dB	0
	BY OBSTACLES			dB	0
	IN FEEDERS (A, B)			dB	0
	BRANCHING TX/RX			dB	4.4
TOTAL			dB	126.64	
LEVELS, INTERRUPTION TIME AND AVAILABILITY	LINK ATTENUATION			dB	56.04
	RX LEVEL WITHOUT FADING			dBm	-40.04
	THRESHOLD LEVEL (BER = 1E-3)			dBm	-66.50
	THRESHOLD LEVEL (BER = 1E-6)			dBm	-65.50
	FADING MARGIN (BER = 1 E-3)			dB	26.46
	FADING MARGIN (BER = 1 E-6)			dB	25.46
	PROBABILITY OF RAYLEIGH FADING			%	0.005221481
	OBJECTIVE INTERRUPTION TIME (BER = 1 E-3)			%	3.07.E-05
	OBJECTIVE INTERRUPTION TIME (BER = 1 E-6)			%	2.27.E-04
	FADING DEPTH (BER = 1 E-3)			dB	22.31
	FADING DEPTH (BER = 1 E-6)			dB	13.61
	RX LEVEL WITH FADING (BER = 1 E-3)			dBm	-62.35
	RX LEVEL WITH FADING (BER = 1 E-6)			dBm	-53.65
	REAL INTERRUPTION TIME (BER = 1 E-3)			%	1.18.E-05
	REAL INTERRUPTION TIME REAL (BER = 1 E-6)			%	1.48.E-05
	AVAILABILITY (BER = 1 E-3)			%	100.0000
ANNUAL REAL INTERRUPTION TIME			s	4	
UIT - R OBJETIVES HIGH GRADE				Cumple	

Tabla 4.36 Cálculo de propagación para el enlace eNB 1 – eNB 2

HOP CONFIGURATION AND PERFORMANCE					
TOPOLOGY	eNb 1		eNb 3		Notes
LATITUDE	S 8°	7' 19.55"	S 8°	6' 4.68"	
LONGITUDE	W 79°	2' 10.67"	W 79°	2' 47.75"	
AZIMUTH	334°		154°		
ANTENNA TYPE	VHLP2-23AW1A		VHLP2-23AW1A		1x0.60 + 1x0.60
FREQUENCY TX	22.63800 GHz		21.40600 GHz		23 GHz
LINK TYPE	ALU MPR 23GHZ				
POLARIZATION	Vertical				
PROPAGATION AND AVAILABILITY CALCULATION					
EQUIPMENT	RF CENTRAL FREQUENCY			GHz	22.022
	TRANSMITTER POWER			dBm	14.00
	IF BANDWIDTH			MHz	56
LINK	LINK DISTANCE			Km	2.57
	FEEDER LENGTH AT A			m	0
	FEEDER LENGTH AT B			m	0
	FEEDER UNIT LOSS			dB/m	0
GAINS	ANTENNA GAIN AT A			dB	40.5
	ANTENNA GAIN AT B			dB	40.5
	TOTAL GAIN			dB	81.0
LOSSES	FREE SPACE			dB	127.47
	BY FLAT SURFACE			dB	0
	BY OBSTACLES			dB	0
	IN FEEDERS (A, B)			dB	0
	BRANCHING TX/RX			dB	4.4
TOTAL			dB	131.87	
LEVELS, INTERRUPTION TIME AND AVAILABILITY	LINK ATTENUATION			dB	50.87
	RX LEVEL WITHOUT FADING			dBm	-36.87
	THRESHOLD LEVEL (BER = 1E-3)			dBm	-66.50
	THRESHOLD LEVEL (BER = 1E-6)			dBm	-65.50
	FADING MARGIN (BER = 1 E-3)			dB	29.63
	FADING MARGIN (BER = 1 E-6)			dB	28.63
	PROBABILITY OF RAYLEIGH FADING			%	0.031335423
	OBJECTIVE INTERRUPTION TIME (BER = 1 E-3)			%	5.56.E-05
	OBJECTIVE INTERRUPTION TIME (BER = 1 E-6)			%	4.12.E-04
	FADING DEPTH (BER = 1 E-3)			dB	27.51
	FADING DEPTH (BER = 1 E-6)			dB	18.81
	RX LEVEL WITH FADING (BER = 1 E-3)			dBm	-64.38
	RX LEVEL WITH FADING (BER = 1 E-6)			dBm	-55.68
	REAL INTERRUPTION TIME (BER = 1 E-3)			%	3.41.E-05
	REAL INTERRUPTION TIME REAL (BER = 1 E-6)			%	4.29.E-05
	AVAILABILITY (BER = 1 E-3)			%	100.0000
ANNUAL REAL INTERRUPTION TIME			s	11	
UIT - R OBJETIVES HIGH GRADE				Cumple	

Tabla 4.37 Cálculo de propagación para el enlace eNB 1 – eNB 3

HOP CONFIGURATION AND PERFORMANCE					
TOPOLOGY	eNb 1		eNb 4		Notes
LATITUDE	S 8°	7' 19.55"	S 8°	6' 20.88"	
LONGITUDE	W 79°	2' 10.67"	W 79°	1' 44.03"	
AZIMUTH	24°		204°		
ANTENNA TYPE	VHLP1-23AW1A		VHLP1-23AW1A		1x0.30 + 1x0.30
FREQUENCY TX	22.58200 GHz		21.35000 GHz		23 GHz
LINK TYPE	ALU MPR 23GHZ				
POLARIZATION	Vertical				
PROPAGATION AND AVAILABILITY CALCULATION					
EQUIPMENT	RF CENTRAL FREQUENCY			GHz	21.966
	TRANSMITTER POWER			dBm	12.00
	IF BANDWIDTH			MHz	56
LINK	LINK DISTANCE			Km	1.99
	FEEDER LENGTH AT A			m	0
	FEEDER LENGTH AT B			m	0
	FEEDER UNIT LOSS			dB/m	0
GAINS	ANTENNA GAIN AT A			dB	35.3
	ANTENNA GAIN AT B			dB	35.3
	TOTAL GAIN			dB	70.6
LOSSES	FREE SPACE			dB	125.19
	BY FLAT SURFACE			dB	0
	BY OBSTACLES			dB	0
	IN FEEDERS (A, B)			dB	0
	BRANCHING TX/RX			dB	4.4
	TOTAL			dB	129.59
LEVELS, INTERRUPTION TIME AND AVAILABILITY	LINK ATTENUATION			dB	58.99
	RX LEVEL WITHOUT FADING			dBm	-46.99
	THRESHOLD LEVEL (BER = 1E-3)			dBm	-66.50
	THRESHOLD LEVEL (BER = 1E-6)			dBm	-65.50
	FADING MARGIN (BER = 1 E-3)			dB	19.51
	FADING MARGIN (BER = 1 E-6)			dB	18.51
	PROBABILITY OF RAYLEIGH FADING			%	0.01434851
	OBJECTIVE INTERRUPTION TIME (BER = 1 E-3)			%	4.29.E-05
	OBJECTIVE INTERRUPTION TIME (BER = 1 E-6)			%	3.18.E-04
	FADING DEPTH (BER = 1 E-3)			dB	25.24
	FADING DEPTH (BER = 1 E-6)			dB	16.55
	RX LEVEL WITH FADING (BER = 1 E-3)			dBm	-72.23
	RX LEVEL WITH FADING (BER = 1 E-6)			dBm	-63.54
	REAL INTERRUPTION TIME (BER = 1 E-3)			%	1.61.E-04
	REAL INTERRUPTION TIME REAL (BER = 1 E-6)			%	2.02.E-04
	AVAILABILITY (BER = 1 E-3)			%	99.9998
	ANNUAL REAL INTERRUPTION TIME			s	51
UIT - R OBJETIVES HIGH GRADE				Cumple	

Tabla 4.38 Cálculo de propagación para el enlace eNB 1 – eNB 4

HOP CONFIGURATION AND PERFORMANCE						
TOPOLOGY	eNb 2		eNb 5		Notes	
LATITUDE	S 8°	7'	27.83"	S 8°	6'	46.43"
LONGITUDE	W 79°	1'	24.96"	W 79°	0'	41.76"
AZIMUTH	46°		226°			
ANTENNA TYPE	VHLP1-23AW1A		VHLP1-23AW1A		1x0.30 + 1x0.30	
FREQUENCY TX	21.29400 GHz		22.52600 GHz		23 GHz	
LINK TYPE	ALU MPR 23GHZ					
POLARIZATION	Vertical					
PROPAGATION AND AVAILABILITY CALCULATION						
EQUIPMENT	RF CENTRAL FREQUENCY				GHz	21.91
	TRANSMITTER POWER				dBm	14.00
	IF BANDWIDTH				MHz	56
LINK	LINK DISTANCE				Km	1.84
	FEEDER LENGTH AT A				m	0
	FEEDER LENGTH AT B				m	0
	FEEDER UNIT LOSS				dB/m	0
GAINS	ANTENNA GAIN AT A				dB	35.3
	ANTENNA GAIN AT B				dB	35.3
	TOTAL GAIN				dB	70.6
LOSSES	FREE SPACE				dB	124.50
	BY FLAT SURFACE				dB	0
	BY OBSTACLES				dB	0
	IN FEEDERS (A, B)				dB	0
	BRANCHING TX/RX				dB	4.4
	TOTAL				dB	128.90
LEVELS, INTERRUPTION TIME AND AVAILABILITY	LINK ATTENUATION				dB	58.30
	RX LEVEL WITHOUT FADING				dBm	-44.30
	THRESHOLD LEVEL (BER = 1E-3)				dBm	-66.50
	THRESHOLD LEVEL (BER = 1E-6)				dBm	-65.50
	FADING MARGIN (BER = 1 E-3)				dB	22.20
	FADING MARGIN (BER = 1 E-6)				dB	21.20
	PROBABILITY OF RAYLEIGH FADING				%	0.011339905
	OBJECTIVE INTERRUPTION TIME (BER = 1 E-3)				%	3.97.E-05
	OBJECTIVE INTERRUPTION TIME (BER = 1 E-6)				%	2.94.E-04
	FADING DEPTH (BER = 1 E-3)				dB	24.56
	FADING DEPTH (BER = 1 E-6)				dB	15.86
	RX LEVEL WITH FADING (BER = 1 E-3)				dBm	-68.86
	RX LEVEL WITH FADING (BER = 1 E-6)				dBm	-60.16
	REAL INTERRUPTION TIME (BER = 1 E-3)				%	6.83.E-05
	REAL INTERRUPTION TIME REAL (BER = 1 E-6)				%	8.60.E-05
	AVAILABILITY (BER = 1 E-3)				%	99.9999
	ANNUAL REAL INTERRUPTION TIME				s	22
UIT - R OBJETIVES HIGH GRADE					Cumple	

Tabla 4.39 Cálculo de propagación para el enlace eNB 2 – eNB 5

HOP CONFIGURATION AND PERFORMANCE							
TOPOLOGY	eNb 3		eNb 7		Notes		
LATITUDE	S 8°	6'	4.68"	S 8°	5'	47.76"	
LONGITUDE	W 79°	2'	47.75"	W 79°	1'	58.07"	
AZIMUTH	71°		251°				
ANTENNA TYPE	VHLP1-AW1A		VHLP1-AW1A		1x0.30 + 1x0.30		
FREQUENCY TX	21.51800 GHz		22.75000 GHz		23 GHz		
LINK TYPE	ALU MPR 23GHZ						
POLARIZATION	Vertical						
PROPAGATION AND AVAILABILITY CALCULATION							
EQUIPMENT	RF CENTRAL FREQUENCY		GHz	22.134			
	TRANSMITTER POWER		dBm	17.00			
	IF BANDWIDTH		MHz	56			
LINK	LINK DISTANCE		Km	1.61			
	FEEDER LENGTH AT A		m	0			
	FEEDER LENGTH AT B		m	0			
	FEEDER UNIT LOSS		dB/m	0			
GAINS	ANTENNA GAIN AT A		dB	35.3			
	ANTENNA GAIN AT B		dB	35.3			
	TOTAL GAIN		dB	70.6			
LOSSES	FREE SPACE		dB	123.41			
	BY FLAT SURFACE		dB	0			
	BY OBSTACLES		dB	0			
	IN FEEDERS (A, B)		dB	0			
	BRANCHING TX/RX		dB	4.4			
TOTAL		dB	127.81				
LEVELS, INTERRUPTION TIME AND AVAILABILITY	LINK ATTENUATION		dB	57.21			
	RX LEVEL WITHOUT FADING		dBm	-40.21			
	THRESHOLD LEVEL (BER = 1E-3)		dBm	-66.50			
	THRESHOLD LEVEL (BER = 1E-6)		dBm	-65.50			
	FADING MARGIN (BER = 1 E-3)		dB	26.29			
	FADING MARGIN (BER = 1 E-6)		dB	25.29			
	PROBABILITY OF RAYLEIGH FADING		%	0.007644017			
	OBJECTIVE INTERRUPTION TIME (BER = 1 E-3)		%	3.47.E-05			
	OBJECTIVE INTERRUPTION TIME (BER = 1 E-6)		%	2.57.E-04			
	FADING DEPTH (BER = 1 E-3)		dB	23.43			
	FADING DEPTH (BER = 1 E-6)		dB	14.74			
	RX LEVEL WITH FADING (BER = 1 E-3)		dBm	-63.64			
	RX LEVEL WITH FADING (BER = 1 E-6)		dBm	-54.95			
	REAL INTERRUPTION TIME (BER = 1 E-3)		%	1.80.E-05			
	REAL INTERRUPTION TIME REAL (BER = 1 E-6)		%	2.26.E-05			
AVAILABILITY (BER = 1 E-3)		%	100.0000				
ANNUAL REAL INTERRUPTION TIME		s	6				
UIT - R OBJETIVES HIGH GRADE		Cumple					

Tabla 4.40 Cálculo de propagación para el enlace eNB 3 – eNB 7

HOP CONFIGURATION AND PERFORMANCE					
TOPOLOGY	eNb 4		eNb 6		Notes
LATITUDE	S 8°	6' 20.88"	S 8°	5' 30.47"	
LONGITUDE	W 79°	1' 44.03"	W 79°	0' 51.48"	
AZIMUTH	46°		226°		
ANTENNA TYPE	VHLP1-23AW1A		VHLP1-23AW1A		1x0.30 + 1x0.30
FREQUENCY TX	21.29400 GHz		22.52600 GHz		23 GHz
LINK TYPE	ALU MPR 23GHZ				
POLARIZATION	Vertical				
PROPAGATION AND AVAILABILITY CALCULATION					
EQUIPMENT	RF CENTRAL FREQUENCY			GHz	21.91
	TRANSMITTER POWER			dBm	14.00
	IF BANDWIDTH			MHz	56
LINK	LINK DISTANCE			Km	2.24
	FEEDER LENGTH AT A			m	0
	FEEDER LENGTH AT B			m	0
	FEEDER UNIT LOSS			dB/m	0
GAINS	ANTENNA GAIN AT A			dB	35.3
	ANTENNA GAIN AT B			dB	35.3
	TOTAL GAIN			dB	70.6
LOSSES	FREE SPACE			dB	126.20
	BY FLAT SURFACE			dB	0
	BY OBSTACLES			dB	0
	IN FEEDERS (A, B)			dB	0
	BRANCHING TX/RX			dB	4.4
	TOTAL			dB	130.60
LEVELS, INTERRUPTION TIME AND AVAILABILITY	LINK ATTENUATION			dB	60.00
	RX LEVEL WITHOUT FADING			dBm	-46.00
	THRESHOLD LEVEL (BER = 1E-3)			dBm	-66.50
	THRESHOLD LEVEL (BER = 1E-6)			dBm	-65.50
	FADING MARGIN (BER = 1 E-3)			dB	20.50
	FADING MARGIN (BER = 1 E-6)			dB	19.50
	PROBABILITY OF RAYLEIGH FADING			%	0.020442315
	OBJECTIVE INTERRUPTION TIME (BER = 1 E-3)			%	4.83.E-05
	OBJECTIVE INTERRUPTION TIME (BER = 1 E-6)			%	3.58.E-04
	FADING DEPTH (BER = 1 E-3)			dB	26.27
	FADING DEPTH (BER = 1 E-6)			dB	17.57
	RX LEVEL WITH FADING (BER = 1 E-3)			dBm	-72.27
	RX LEVEL WITH FADING (BER = 1 E-6)			dBm	-63.57
	REAL INTERRUPTION TIME (BER = 1 E-3)			%	1.82.E-04
	REAL INTERRUPTION TIME REAL (BER = 1 E-6)			%	2.30.E-04
	AVAILABILITY (BER = 1 E-3)			%	99.9998
	ANNUAL REAL INTERRUPTION TIME			s	57
UIT - R OBJETIVES HIGH GRADE				Cumple	

Tabla 4.41 Cálculo de propagación para el enlace eNB 4 – eNB 6

En particular, el servicio de conectividad IP de la red troncal EPC puede ofrecerse también a través de las redes de acceso 3GPP anteriores a LTE, es decir, UTRAN y GERAN. La interconexión de estas redes de acceso a una red LTE se realiza a través de interfaces específicas con la nueva red troncal EPC de forma que se garantiza la continuidad de los servicios cuando los terminales cambian de red de acceso. Además, el sistema LTE contempla también la posibilidad de utilizar redes de acceso no estandarizadas tales como cdma2000.

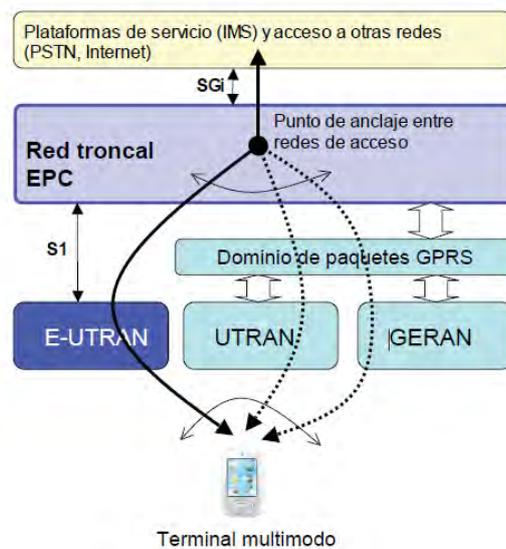


Figura 4.19 Interconexión entre redes de acceso 3GPP [6]

La solución de interconexión entre redes de acceso 3GPP se sustenta fundamentalmente en la introducción de un punto de anclaje en la red troncal EPC que permite la movilidad entre las redes de acceso sin que el servicio de conectividad IP se vea afectado. La interconexión de UTRAN y GERAN a la red troncal EPC se realiza mediante el soporte de funciones del dominio de paquetes GPRS de la red UMTS. La Figura 4.19 ilustra de forma gráfica el planteamiento adoptado.

Existen dos modos de realizar la interconexión.

- _ Utilización de interfaces propias del sistema GPRS.
- _ Incorporación de nuevas interfaces entre GPRS y EPC.

4.8.1 UTILIZACIÓN DE INTERFACES PROPIAS DEL SISTEMA GPRS

La utilización de interfaces propias del sistema GPRS está basada en la re-utilización de las interfaces estandarizadas como parte del sistema GPRS para interconectar los equipos de la red troncal GPRS con los equipos de la red troncal EPC.

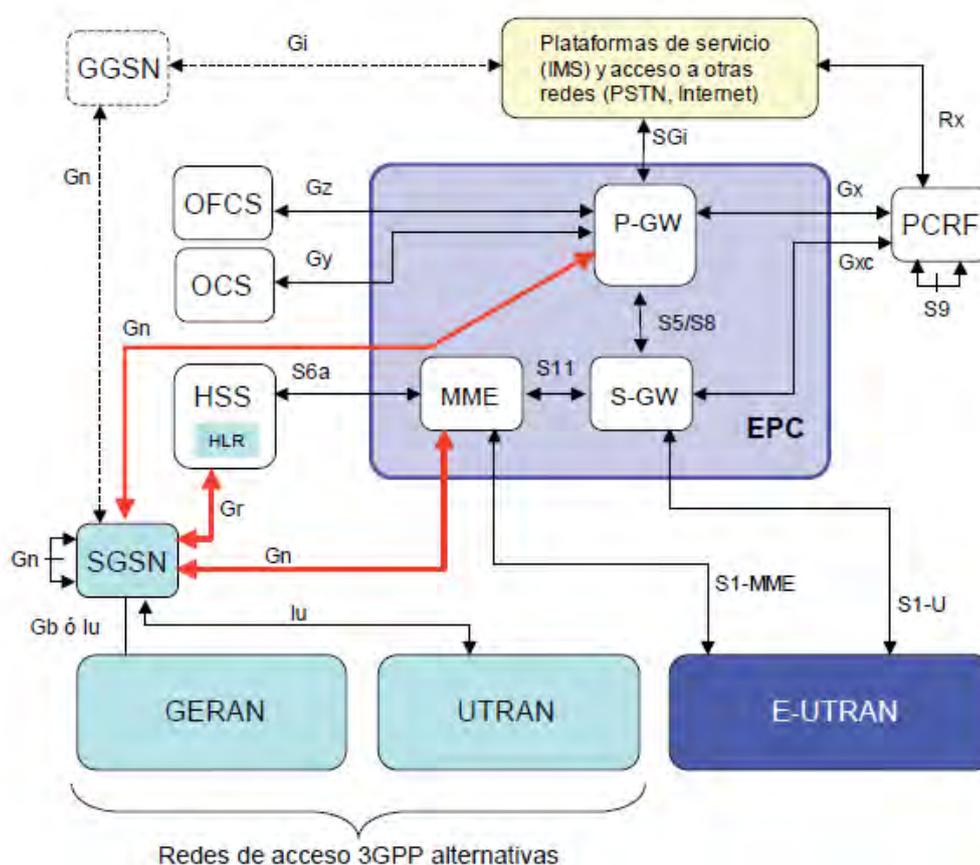


Figura 4.20 Interconexión mediante interfaces propias del sistema GPRS [6]

La Figura 4.20 muestra el detalle de las interfaces necesarias para la mencionada interconexión.

La interconexión entre GERAN, UTRAN y la red troncal EPC se realiza a través de la entidad de red SGSN. El nodo SGSN constituye el punto de entrada de la red troncal a los servicios GPRS ofrecidos a través de las redes de acceso UTRAN y GERAN. El nodo SGSN integra tanto las funciones de plano de control como de plano de usuario para la provisión del servicio GPRS. Comparando la arquitectura de la red troncal GPRS con la red troncal EPC, la entidad SGSN de GPRS sería equivalente a las entidades MME y S-GW de EPC. UTRAN se conecta al SGSN mediante una interfaz denominada Iu-PS mientras que GERAN puede hacerlo mediante la interfaz Gb o bien también a través de una interfaz Iu-PS. El nodo SGSN canaliza toda la señalización entre la red GPRS y el equipo de usuario relativo a las funciones de gestión de movilidad y gestión de las sesiones.

De esta forma, mediante la re-utilización de una interfaz Gn entre SGSN y la pasarela P-GW de la red troncal EPC, se logra la movilidad entre las redes de acceso 3GPP. Por

tanto, a los terminales LTE/UMTS que accedan al servicio de conectividad a través de UTRAN o GERAN, la red GPRS debe asignarles una pasarela P-GW en lugar de un nodo GGSN convencional. De esta forma, cuando los terminales duales tengan cobertura de la red de acceso E-UTRAN, el servicio de conectividad puede restablecerse a través de E-UTRAN manteniendo la misma pasarela P-GW para la interconexión con la red externa. El cambio de una red de acceso UTRAN o GERAN a E-UTRAN contempla también el cambio de SGSN por las entidades de la red troncal EPC correspondientes. En este caso, dicho cambio se sustenta en la implementación de la interfaz Gn entre SGSN y MME. El MME alberga el plano de control de la red troncal EPC y a través de ella, puede articularse el cambio hacia o desde la red de acceso E-UTRAN. Nótese que, a diferencia de lo que ocurre en GPRS, en la interfaz Gn entre SGSN y MME no se transportan paquetes de usuario.

El principio básico de funcionamiento de esta solución es que el servicio de conectividad IP de un usuario del sistema LTE que se conecte a través de las redes de acceso UTRAN o GERAN (debido a, por ejemplo, falta de cobertura de la red E-UTRAN) se establezca a través de la pasarela P-GW apropiada (en lugar de una pasarela GGSN propia de GPRS).

4.8.2 INCORPORACIÓN DE NUEVAS INTERFACES ENTRE GPRS Y EPC

Donde se definen nuevas interfaces que deberían ser soportadas en los equipos de las redes GPRS de cara a su interconexión con una red troncal EPC. Esta opción no es considerada en nuestro análisis.

4.9 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL EQUIPAMIENTO

Para la red de acceso, el eNB a usar para el despliegue serán los Flexi multiradio de Nokia Siemens Networks.

Entre las principales características de este equipo tenemos:

- _ La Flexi multiradio es una multi-portadora que puede utilizar todas esas tecnologías de red tales como GSM / EDGE, WCDMA y LTE.
- _ Permite usar el espacio de las instalaciones existentes en forma eficiente, los módulos existentes de la Flexi GSM (modelo precedente) se pueden instalar junto con los módulos de la Flexi multiradio.
- _ Se pueden utilizar con la Flexi multiradio las baterías existentes de Flexi EDGE, carcassas, fuentes de alimentación y los módulos Flexi 3G.

En la Tabal 4.42 se muestran algunas de sus especificaciones técnicas y la Figura 4.21

muestra el equipo Flexi multiradio.

Frecuencia, BW (Tx/Rx)	850MHz, 15/15MHz	900MHz, 20/20MHz	900MHz, 20/30MHz	1900MHz, 20/20MHz
GSM TRXs	6+6+6	6+6+6	6+6+6	6+6+6
Portadoras WCDMA	2+2+2	4+4+4	4+4+4	4+4+4
Ancho de banda de LTE	1.4/3/5/10	1.4/3/5/10/15/20	1.4/3/5/10/15/20	1.4/3/5/10/15/20
Potencia de salida/sector	60W	60W	60W	60W
Modo compartido Soportado por HW	GSM/LTE GSM/WCDMA	GSM/LTE GSM/WCDMA	GSM/LTE GSM/WCDMA	GSM/LTE GSM/WCDMA
GSM 444 MHz 5	GSM/WCDMA/LTE	GSM/WCDMA/LTE	GSM/WCDMA/LTE	GSM/WCDMA/LTE
GSM 333 MHz 10	WCDMA/LTE	WCDMA/LTE	WCDMA/LTE	WCDMA/LTE

Tabla 4.42 Especificaciones RF del eNB Flexi multiradio [26]



Figura 4.21 eNB Flexi Multiradio [26]

Se debe tener en cuenta que actualmente la empresa América Móvil está instalando este modelo a nivel nacional para brindar servicios 2G y 3G lo cual significaría un ahorro de CAPEX para el despliegue de la red LTE puesto que solo se necesitaría realizar una actualización de software e instalación de tarjetas.

En la red de transporte como se mencionó anteriormente el modelo de MW a instalar

serán los MPT 9500 Rel. 3.0.0 Microwave Packet Radio del proveedor Alcatel-Lucent.

En la Tabla 4.43 se muestran sus principales especificaciones técnicas de este equipo de MW.

General with ODU300		Alcatel-Lucent 
Operating Frequency Range	6 - 38 GHz	
Max Ethernet throuput	from 10 up to 310 Mbit/s	
Modulation Options in FCM	4 QAM, 16 QAM, 32 QAM, 64 QAM, 128 QAM, 256 QAM	
Adaptive Modulation	4 QAM, 16 QAM, 64 QAM,	
General with MPT-HC/MPT-HC V2		
Operating Frequency Range	6 - 38 GHz	
Max Ethernet throuput	340 Mbit/s	
Bandwidth	up to 56 MHz	
Modulation Options in FCM	4 QAM, 16 QAM, 32 QAM, 64 QAM, 128 QAM, 256 QAM	
Adaptive Modulation	4 QAM, 16 QAM, 32 QAM, 64 QAM, 128 QAM, 256 QAM	
General with MPT-MC		
Operating Frequency Range	6 - 38 GHz	
Max Ethernet throuput	155 Mbit/s	
Bandwidth	up to 28 MHz	
Modulation Options in FCM	4 QAM, 16 QAM, 32 QAM, 64 QAM, 128 QAM	
Adaptive Modulation	4 QAM, 16 QAM, 32 QAM, 64 QAM, 128 QAM	
Radio Path Protection Options		
Non Protected, 1+0 Protected Hot Standby, 1+1 Space Diversity, 1+1 Frequency Diversity, 1+1 (with ODU300, MPT-HC/MPT-HC V2) Radio LAG with two radio channels		
MSS Power supply		
Input voltage range	-40.5 to -57.6 Vdc	The input voltage range can be also from -57 to -80 Vdc without any damage, but with no guaranteed performance

Tabla 4.43 Especificaciones técnicas del MPT 9500 [23]

La Figura 4.22 muestra el equipo de radio MPR de Alcatel-Lucent.

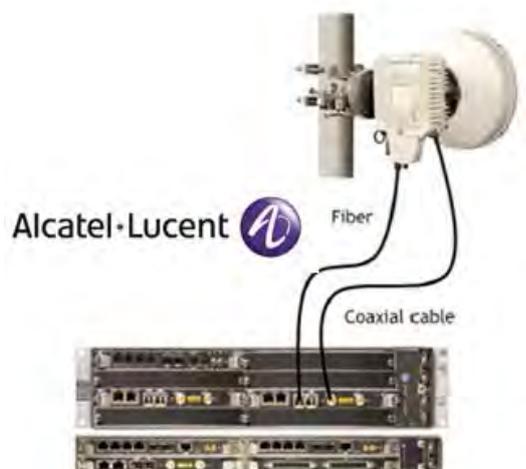


Figura 4.22 Microondas MTP 9500 de Alcatel-Lucent [23]

4.10 TIEMPO DE IMPLEMENTACIÓN

En la Tabla 4.44 se detallan los aspectos considerados para la implementación y puesta en servicio de nuestra red. Los tiempos tomados para cada proceso están basados en la experiencia con que se cuentan en la implementación de redes 2G y 3G, desde el punto de vista de un operador.

ID	Task Name	Duration	Start	Finish	2013											
					Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun
1	1 Implementación de un Red LTE en la ciudad de Trujillo	183 days	Mon 01/10/12	Wed 12/06/13	[Gantt chart showing the project timeline from October 2012 to July 2013]											
2	1.1 Planificación y Diseño	22 days	Mon 01/10/12	Tue 30/10/12	[Gantt chart showing the project timeline from October 2012 to July 2013]											
3	1.1.1 Estudio de campo	15 days	Mon 01/10/12	Fri 19/10/12	[Gantt chart showing the project timeline from October 2012 to July 2013]											
4	1.1.2 Definición del diseño	7 days	Mon 22/10/12	Tue 30/10/12	[Gantt chart showing the project timeline from October 2012 to July 2013]											
5	1.2 Adquisición de equipos	105 days	Wed 31/10/12	Tue 26/03/13	[Gantt chart showing the project timeline from October 2012 to July 2013]											
6	1.2.1 Fabricación y entrega de equipos	90 days	Wed 31/10/12	Tue 05/03/13	[Gantt chart showing the project timeline from October 2012 to July 2013]											
7	1.2.2 Traslado de equipos a zona	15 days	Wed 06/03/13	Tue 26/03/13	[Gantt chart showing the project timeline from October 2012 to July 2013]											
8	1.3 Adecuaciones	36 days	Wed 31/10/12	Wed 19/12/12	[Gantt chart showing the project timeline from October 2012 to July 2013]											
9	1.3.1 Fabricación de soportes	21 days	Wed 31/10/12	Wed 28/11/12	[Gantt chart showing the project timeline from October 2012 to July 2013]											
10	1.3.2 Instalación de soportes	15 days	Thu 29/11/12	Wed 19/12/12	[Gantt chart showing the project timeline from October 2012 to July 2013]											
11	1.4 Instalación de equipos	35 days	Wed 27/03/13	Tue 14/05/13	[Gantt chart showing the project timeline from October 2012 to July 2013]											
12	1.4.1 Instalación de equipos RF	15 days	Wed 27/03/13	Tue 16/04/13	[Gantt chart showing the project timeline from October 2012 to July 2013]											
13	1.4.2 Instalación de equipos de MW	15 days	Wed 17/04/13	Tue 07/05/13	[Gantt chart showing the project timeline from October 2012 to July 2013]											
14	1.4.3 Configuraciones y pruebas	5 days	Wed 08/05/13	Tue 14/05/13	[Gantt chart showing the project timeline from October 2012 to July 2013]											
15	1.5 Puesta en operación	21 days	Wed 15/05/13	Wed 12/06/13	[Gantt chart showing the project timeline from October 2012 to July 2013]											
16	1.5.1 Pruebas de aceptación	14 days	Wed 15/05/13	Mon 03/06/13	[Gantt chart showing the project timeline from October 2012 to July 2013]											
17	1.5.2 Periodo de prueba	7 days	Tue 04/06/13	Wed 12/06/13	[Gantt chart showing the project timeline from October 2012 to July 2013]											
18	1.5.3 Puesta en servicio comercial	0 days	Wed 12/06/13	Wed 12/06/13	[Gantt chart showing the project timeline from October 2012 to July 2013]											

Tabla 4.44 Tiempo de implementación de la red [Elaboración propia]

CAPÍTULO V ASPECTOS ECONÓMICOS

El objetivo de este capítulo es analizar los aspectos económicos del proyecto teniendo en cuenta los costos de inversión e instalación, conocidos como CAPEX (CAPital EXpenditures) y los costos de operación, conocidos como OPEX (OPeration EXpenditures). Esto nos permitirá determinar la factibilidad de implementar una red LTE en la ciudad de Trujillo.

5.1 COSTOS DE INVERSIÓN E INSTALACIÓN (CAPEX)

Se considera como costos de inversión a la implementación de la red de acceso, la red de transporte y la actualización del software y hardware necesarios en el Core (actualmente la empresa Claro cuenta con un Core descentralizado).

Detalles	Cantidad	Precio (\$)	Total (\$)
Red de Acceso			
Equipos terminales	2000	300	600000
Estación base (eNB)	7	26000	182000
Antenas RF (incluyendo feeders y conectores)	18	500	9000
Red de transporte			
Enlaces de MW	6	30000	180000
Core			
Hardware			50000
Software			30000
Infraestructura			
Adecuaciones a torres	7	800	5600
Total CAPEX			1056600

Tabla 5.1 CAPEX del proyecto [22]

Empezaremos estimando los costos de la implementación de la Red de Acceso la cual asumirá costos de los equipos terminales, sistema radiante, infraestructura, entre otros. La Red de Transporte básicamente asumirá la compra de los equipos de microondas. Mientras

que el Core cubrirá los gastos de licencias y/o tarjetas necesarias para realizar un up-grade de los equipos actuales.

Todos los elementos y costos serán considerados teniendo en cuenta que esta red es parte del despliegue de una operadora existente en el medio (en nuestro caso Claro). El uso de algunos recursos ya existente nos permite reducir costos considerablemente.

En la Tabla 5.1 se resume el CAPEX del proyecto. Se observa que el capital invertido para la implementación del proyecto asciende a \$ 1 056 600. Se tiene que tener en consideración que los precios señalados para cada elemento son referenciales, estos pueden variar a lo largo del tiempo según cómo evolucione la tecnología.

5.2 COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (OPEX)

Consiste en la estimación de los costos post implementación que surgirán durante los años de operatividad de la red.

Estos costos se verán reducidos gracias al concepto del SON (Self-Organizing Network), lo cual permite la auto-configuración, auto-operación y auto-optimización de la red. Así mismo, se debe tener en cuenta el concepto del SDR (Software Defined Radio) que permite realizar mejoras de los equipos de radio solo mediante la actualización de software.

Al ser parte del despliegue de un operador ya existente en la zona, se podrá dejar de considerar gastos como: alquiler de local, pago de licencia a las municipalidades, pago a vigilantes, personal de operación y mantenimiento en campo (O&M), costos de interconexión, entre otros.

Un gasto relevante que no será considerado es el originado por el Canon de uso de frecuencias. Cuando una empresa realiza la adquisición de una banda lo hace para usarlo a nivel nacional y no de manera exclusiva en un departamento. Por lo tanto, no se puede cargar este costo al proyecto, de lo contrario este se incrementará considerablemente.

Por otro lado, a estos gastos se deben considerar aquellos que son adquiridos con instituciones públicas vinculadas con las telecomunicaciones. En la Tabla 5.2 se detallan a estas instituciones con sus respectivos gastos.

Detalles	Gasto
Fitel	1 % de los ingresos
Osiptel	0.5 % de los ingresos
MTC	0.5 % de los ingresos

Tabla 5.2 Gastos generados por instituciones públicas

Esto nos indica que el valor del OPEX ira variando de acuerdo a los años de vida del vida del proyecto y a sus respectivos ingresos.

5.3 ESTUDIO ECONÓMICO

Una vez definido el CAPEX y OPEX de la implementación de la red es necesario definir si el proyecto es factible económicamente y conocer el tiempo de retorno de la inversión. Previamente se debe realizar un estimado de los ingresos proyectados para luego poder realizar el análisis del flujo de caja y poder definir la factibilidad.

5.3.1 INGRESOS

Los ingresos derivan directamente de la cantidad de líneas que serán adquiridos por los clientes y estarán en servicio dentro de nuestra red. En el Capítulo 3 se indicó cual será nuestra estrategia de ingreso al mercado para lo cual se definieron tres diferentes tipos de planes: básico, negocio y empresario con costos de \$ 30, \$ 100 y \$ 300 respectivamente. La Tabla 5.3 detalla los ingresos anuales según los planes ofrecidos.

Plan	Año 1		Año 2		Año 3		Año 4	
	Clientes	Ingreso	Clientes	Ingreso	Clientes	Ingreso	Clientes	Ingreso
Básico	1891	56730	3152	94560	5043	151290	5358	160740
Negocio	315	31500	630	63000	945	94500	1260	126000
Empresario	63	18900	157	47100	315	94500	441	132300
Total	NA	107130	NA	204660	NA	340290	NA	419040

Tabla 5.3 Ingreso anual [Elaboración propia]

5.3.2 FLUJO DE CAJA

Para el cálculo del flujo de caja se deben tomar en cuenta los montos de egresos e ingresos ya conocidos. Además, se debe considerar la inversión inicial para la implementación y los cobros realizados por las instituciones públicas.

La Tabla 5.4 muestra los montos cobrados por las instituciones públicas.

Detalles	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
Fitel	1071.3	2046.6	2898.6	3402.9
MTC	535.65	1023.3	1449.3	1701.45
Osiptel	535.65	1023.3	1449.3	1701.45
Total	2142.6	4093.2	5797.2	6805.8

Tabla 5.4 Pagos a realizar con instituciones públicas [Elaboración propia].

En base a la información de las Tablas 5.1, 5.3, 5.4 se construye el flujo de cajas mostrado en la Tabla 5.5.

Detalle	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
Inversión	1056600				
Egresos		2142.6	4093.2	5797.2	6805.8
Ingresos		707130	204660	289860	340290
Flujo de caja	-1056600	704987.4	200566.8	284062.8	333484.2

Tabla 5.5 Flujo de caja [Elaboración propia].

En la Tabla 5.5 se observa que se considera un periodo de tiempo denominado “Año Cero”, periodo durante el cual se realiza la inversión inicial del proyecto. Es decir, durante este periodo se realizará la compra e instalación de los equipos, adecuaciones de las estaciones, trámites administrativos, etc.

En el cálculo del CAPEX se tomó en cuenta la compra de equipos terminales, pero estos representan un gasto temporal para la empresa puesto que estos serán vendidos en el primer año de expansión del proyecto (generan ingresos). La compra de nuevos equipos para los clientes en los siguientes no es tomada en cuenta en los gastos o ingresos.

5.3.2 INDICADORES ECONÓMICOS

Los indicadores económicos relevantes empleados para la formulación y evaluación económica del presente estudio será: VAN, TIR y periodo de recupero. A continuación, se dará una breve explicación de estos conceptos:

- _ El VAN (Valor Actual Neto) es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión.
- _ EL TIR (Tasa Interna de Retorno) es la tasa de interés con la cual el VAN es igual a cero. Se utiliza para decidir sobre la aceptación o rechazo de un proyecto de inversión (a mayor TIR, mayor rentabilidad).
- _ El Periodo de Recupero es un indicador que indica el tiempo en que la inversión realizada será recuperada.

Se debe tener en cuenta que para el cálculo del VAN la empresa Claro considera valores de COK (costos de capital de inversión) entre el 8 al 12 % [22]. Los cálculos serán realizados con un COK igual al 12%. En la Tabla 5.6 se muestran los resultados obtenidos.

COK	TIR	VAN
12.00 %	19.7 %	\$ 146,869.19

Tabla 5.6 Análisis del TIR y VAN del proyecto.

Como se puede observar en la Tabla 5.6 los valores del VAN y TIR de nuestra inversión son positivos por lo que el proyecto es rentable para la empresa.

El tiempo de retorno, según lo mostrado en la Tabla 5.7, es de 3 años a partir de la operatividad de la red.

Periodo	Flujo Anual	Flujo acumulado
Año 0	-1056600	-1056600
Año 1	704987.4	-351612.6
Año 2	200566.8	-151045.8
Año 3	284062.8	133017

Tabla 5.7 Tiempo de retorno [Elaboración propia].

Todo proyecto puede sufrir cambios en los valores de inversión, gastos o ingresos proyectados. Cada uno de estos cambios afecta directamente a la factibilidad del proyecto, afectación que puede ser de manera favorable o desfavorable.

El VAN calculado en la Tabla 5.6 es realizado con un valor de COK estandarizado para los proyectos de Claro, ahora surge la pregunta ¿Qué pasaría si la empresa varía sus expectativas? En la Tabla 5.7 y Figura 5.1 se muestra que el COK y el VAN tienen una relación indirectamente proporcional.

COK	VAN
7%	\$263,742.90
8%	\$238,738.87
9%	\$214,587.71
10%	\$191,250.10
11%	\$168,688.94
12%	\$146,869.19
13%	\$125,757.75
14%	\$105,323.36
15%	\$85,536.41
16%	\$66,368.93
17%	\$47,794.41
18%	\$29,787.73
19%	\$12,325.11
20%	-\$4,616.02
21%	-\$21,057.08
22%	-\$37,018.38

Tabla 5.7 Variación del VAN en función del COK [Elaboración propia]

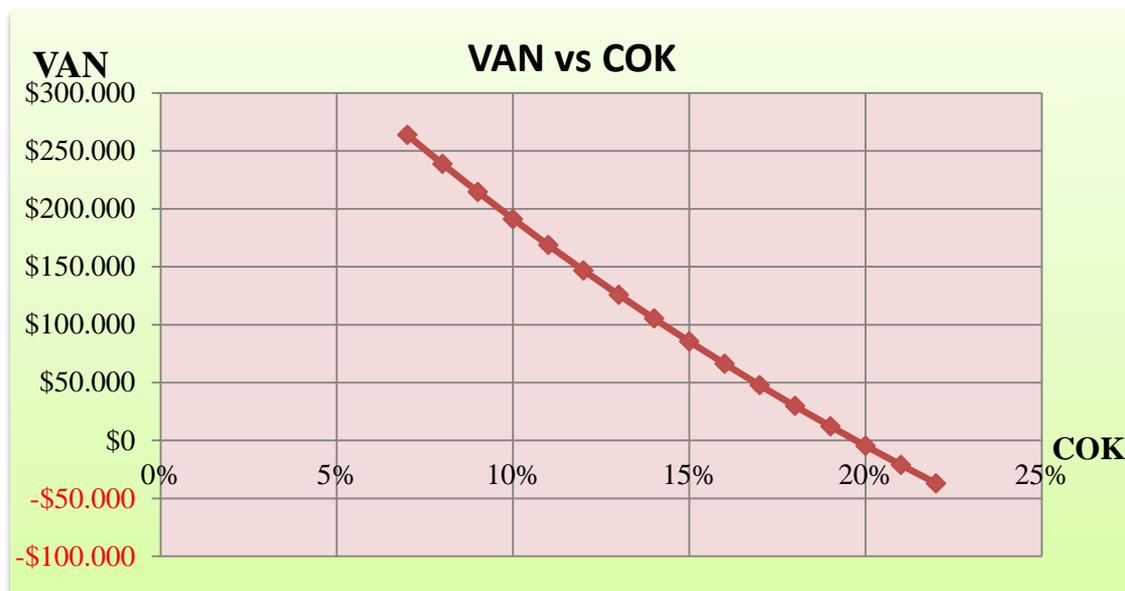


Figura 5.1 Variación del VAN en función del COK [Elaboración propia]

En las Tablas 5.8, 5.9 y 5.10 se observa como varían los indicadores económicos (VAN y TIR) del proyecto con el cambio del valor proyectado para la inversión, egreso o ingresos.

Variación de la inversión	Valores base		Valores modificados		Variación	
	VAN	TIR	VAN	TIR	VAN	TIR
-30%	\$146,869.19	19.7%	\$463,849.19	46.2%	215.8%	134.4%
-20%			\$358,189.19	35.3%	143.9%	78.8%
-10%			\$252,529.19	26.7%	71.9%	35.2%
+10%			\$41,209.19	14.0%	-71.9%	-29.1%
+20%			-\$64,450.81	9.1%	-143.9%	-53.7%
+30%			-\$170,110.81	5.0%	-215.8%	-74.7%

Tabla 5.8 Variación de los indicadores en función de la inversión [Elaboración propia].

Variación de los egresos	Valores base		Valores modificados		Variación	
	VAN	TIR	VAN	TIR	VAN	TIR
-30%	\$146,869.19	19.7%	\$150,957.48	19.9%	2.8%	1.0%
-20%			\$149,594.72	19.9%	1.9%	0.7%
-10%			\$148,231.95	19.8%	0.9%	0.3%
+10%			\$625,467.98	19.7%	325.9%	-0.3%
+20%			\$144,143.66	19.6%	-1.9%	-0.7%
+30%			\$142,780.89	19.5%	-2.8%	-1.0%

Tabla 5.7 Variación de los indicadores en función de los egresos [Elaboración propia].

Variación de la ingresos	Valores base		Valores modificados		Variación	
	VAN	TIR	VAN	TIR	VAN	TIR
-30%	\$146,869.19	19.7%	-\$218,259.86	0.2%	-248.6%	-99.1%
-20%			-\$96,550.18	6.8%	-165.7%	-65.4%
-10%			\$25,159.50	13.3%	-82.9%	-32.4%
+10%			\$268,578.87	26.0%	82.9%	32.0%
+20%			\$390,288.56	32.3%	165.7%	63.7%
+30%			\$511,998.24	38.5%	248.6%	95.3%

Tabla 5.7 Variación de los indicadores en función de los ingresos [Elaboración propia].

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. La ciudad de Trujillo está dentro del departamento que se ubica en el tercer lugar de los departamentos más poblados y de mayor crecimiento económico en el país.
2. La ciudad de Trujillo se destaca por un constante crecimiento económico basado en el comercio, agricultura y turismo. Lo cual la ubica, dentro de la provincia de Trujillo, en el distrito de mayor número de centros comerciales (69 %).
3. La ciudad de Trujillo cuenta con el mayor porcentaje de PEA activa (96.04 %) dentro de la provincia de Trujillo.
4. A nivel de servicios de Telecomunicaciones, esta ciudad cuenta con todos los servicios que son ofrecidos en el actualidad (telefonía móvil, telefonía fija y acceso a internet) y se cuenta con la presencia de los 3 operadores que operan en el país: Movistar, Claro y Nextel.
5. En la presente tesis se presenta el diseño de una red basada en la tecnología de cuarta generación LTE. Actualmente a nivel nacional solo se cuenta con redes de segunda y tercera generación.
6. La elección de la ciudad de Trujillo como piloto para nuestro diseño está basada en que esta ciudad representa una de las 3 ciudades más importantes para los operadores. En esta ciudad se cuenta con equipos de CORE y concentra todo el tráfico del norte de país.
7. La elección de la tecnología está basada en la necesidad de ofrecer una tasa de transmisión que esté acorde a las necesidades de los usuarios de la telefonía móvil, las mismas que actualmente no son cubiertas por las redes 2G y 3G.
8. Los servicios que se ofrecerán están orientados a clientes corporativos y usuarios post-pago.
9. Los conocimientos plasmados en este trabajo (tales como radio propagación, comunicaciones inalámbricas, sistemas de microondas) fueron adquiridos en la universidad (UNI). Adicionalmente, se usaron conocimiento adquiridos en cursos de maestría en Diseños de Redes de Cuarta Generación y en la experiencia laboral adquirida en el diseño

de redes de transportes. Actualmente me encuentro laborando como analista del área de Sistemas de Transporte SDH y DWDM de la empresa América Móvil.

10. El despliegue de esta red no presentara dificultades geográficas para la instalación de los equipos puesto que las estaciones seleccionadas se encuentra en una zona rural. Lo cual aligera los trabajos del personal de operación y mantenimiento.

11. En relación al análisis económico, se observa que la inversión a realizar será alta pero presenta una rentabilidad a corto plazo. Además permitirá a la empresa ser líder en el rubro de las telecomunicaciones logrando la satisfacción de los clientes.

12. Las exigencias del COK, por parte de la empresa, pueden ser incrementadas hasta un valor del 19% sin que el proyecto deje de ser rentable.

13. Según el análisis de sensibilidad la inversión y los ingresos son las variables criticas del proyecto.

14. El proyecto no se ve afectado por variaciones negativas de los egresos, podemos sufrir incrementos mayores al 30% del estimado.

RECOMENDACIONES

1. Realizar los trabajos de instalación en épocas de baja intensidad de lluvia
2. Por motivos de seguridad del personal, la instalación de los equipos de las redes de acceso (antenas RF) y transporte (antenas de microondas) deben realizarse en serie.
3. La empresa responsable del proyecto evitar que el costo de la inversión sufra un incremento superior al 10%, pues a partir de este punto el proyecto pierde su grado de rentabilidad.
4. Los ingresos estimados no deben sufrir decrementos mayores al 10% de lo pronosticado, de lo contrario el proyecto perderá su grado de rentabilidad.

ANEXO A
PROYECCIÓN DE LA PEA AL 2015

CUADRO N° 102

PERU POBLACIÓN ECONOMICAMENTE ACTIVA TOTAL AL 30 DE JUNIO DE 14 AÑOS Y MÁS POR GRUPO DE EDAD, SEGÚN DEPARTAMENTO, 2015

Departamento	Total	14	15 - 19	20 - 24	25 - 29	30 - 34	35 - 39	40 - 44	45 - 49	50 - 54	55 - 59	60 - 64	65 - 69	70 - 74	75 - 79	80 y más
Perú	17 062 409	181 831	1 455 453	2 058 301	2 239 124	2 099 361	1 986 116	1 746 774	1 510 444	1 251 253	936 736	677 454	437 721	263 554	141 970	75 317
Ancash	230 940	3 967	19 767	20 984	33 767	29 106	27 111	24 846	20 627	16 424	12 326	9 060	5 968	3 733	2 175	1 079
Ancash	636 265	8 836	56 826	72 844	82 413	72 373	67 743	63 998	55 097	45 064	35 565	27 209	20 717	14 263	8 683	4 643
Apurimac	249 402	4 323	21 731	22 743	37 141	31 361	27 583	25 525	19 989	16 042	13 665	10 726	8 172	5 623	3 119	1 658
Arequipa	711 869	5 492	52 294	77 662	89 101	87 649	85 615	75 679	68 717	58 435	42 218	29 939	19 213	11 301	5 449	3 005
Ayacucho	379 689	6 891	42 384	50 533	50 839	43 202	38 806	36 207	28 842	23 311	18 609	14 530	11 043	7 642	4 458	2 552
Cajamarca	965 110	20 588	92 119	97 317	120 645	108 207	101 586	90 881	72 710	58 590	46 896	35 579	25 573	17 773	10 830	5 816
Prov. Const. del Callao	539 474	2 768	34 228	62 401	69 204	71 970	72 225	60 517	52 522	43 145	30 411	19 991	11 348	5 276	2 367	1 001
Cusco	779 793	12 144	72 251	83 782	105 451	91 935	83 842	76 619	66 776	56 319	44 765	34 410	23 780	15 389	8 275	4 045
Huancavelica	261 317	6 086	30 540	36 984	38 001	28 657	23 887	23 768	19 028	15 041	12 795	10 013	7 382	5 073	2 881	1 381
Huánuco	471 866	6 998	44 567	48 668	65 793	58 492	54 717	48 921	39 258	31 503	24 690	18 589	12 783	8 552	5 303	2 932
Ica	426 429	4 159	35 904	51 260	51 716	50 753	48 380	43 965	39 214	33 504	25 542	18 418	11 768	6 839	3 473	1 634
Junín	733 653	9 150	73 350	96 041	93 163	82 586	77 421	72 261	61 929	51 212	40 800	30 815	20 503	13 081	7 220	4 121
La Libertad	976 828	8 628	87 787	129 427	132 951	122 602	111 046	95 331	82 107	67 860	51 079	36 331	23 658	14 776	8 591	4 653
Lambayeque	678 887	7 225	63 303	83 599	86 118	78 799	74 979	67 759	60 865	51 521	39 230	27 914	17 751	10 697	5 986	3 341
Lima	5 309 848	27 508	373 609	685 543	692 835	683 049	650 800	545 860	494 661	420 810	297 133	206 887	122 047	63 281	30 503	15 222
Loreto	539 848	7 427	54 219	61 024	73 843	68 637	64 068	57 400	46 597	35 086	27 588	19 810	12 517	6 870	2 843	1 139
Madre de Dios	81 145	988	6 758	8 431	10 595	11 259	10 961	9 350	7 819	5 938	3 354	2 520	1 365	714	343	150
Moquegua	108 656	838	6 570	10 113	11 939	13 415	13 916	13 013	11 433	8 983	6 999	4 972	3 152	1 991	1 067	555
Pasco	160 342	1 889	14 962	21 557	21 120	19 557	18 439	16 772	13 783	10 782	7 898	5 566	3 621	2 344	1 305	746
Piura	971 267	11 892	96 549	121 428	124 132	111 855	107 486	98 568	83 564	68 311	54 377	40 081	25 464	15 710	8 096	4 013
Puno	833 279	13 455	86 321	102 331	111 136	97 823	89 171	77 498	61 723	51 444	42 698	34 063	26 281	19 088	12 144	8 293
San Martín	470 305	5 198	41 145	49 958	60 829	57 725	57 414	53 051	45 433	35 498	25 445	17 608	10 556	6 220	3 087	1 338
Tarma	193 970	1 000	12 701	21 311	24 378	25 474	25 261	21 465	19 101	15 458	11 041	7 603	4 613	2 504	1 312	748
Tumbes	140 606	1 121	10 019	14 545	19 680	20 165	19 795	16 035	12 538	9 875	6 998	4 653	2 609	1 533	775	465
Ucayali	271 821	3 450	26 549	28 114	32 724	32 670	34 054	31 384	26 311	20 397	14 512	10 067	5 846	3 311	1 585	747
Lima Metropolitana 1/	5 351 621	24 243	362 988	683 905	704 866	700 534	670 652	582 025	499 933	422 527	296 944	205 082	115 168	57 632	24 372	10 749

1/ Comprende la Provincia de Lima y la Provincia Constitucional del Callao.

ANEXO B
LISTA DE ABREVIACIONES

3GGP: Proyecto Asociación de Tercera Generación.
3GGP2: Proyecto Asociación de Tercera Generación 2.
ACK: Acuse de recibo positivo.
ADSL: Línea de Abonado Digital Asimétrica.
AMR: Adaptative Multi-Rate.
AS: Access Stratum.
AWS: Servicios inalámbricos avanzados.
BS: Estación Base.
BTS: Estación base de telefonía móvil.
CAPEX: Gastos de capital.
CDMA: Acceso Múltiple por División de Código.
CN: Núcleo de la red.
CODEC: Codificador – Decodificador.
CRC: Comprobación de redundancia cíclica.
DECT: Telecomunicaciones Inalámbricas Mejoradas Digitalmente.
DHCP: Protocolo de configuración dinámica de host.
DL: Enlace de bajada.
DNS: Sistema de nombres de dominio.
DS-CDMA: Acceso múltiple por división de código en secuencia directa.
EDGE: Evolución enriquecida de datos en GSM.
TIR: Tasa Interna de Retorno.
eNB: Nodo B evolucionado.
EPC: Núcleo de Paquetes Evolucionado.
EPS: Sistema de Paquetes Evolucionado.
ETSI: Instituto de Estándares Europeos de Telecomunicaciones.
E-UTRAN: Red de Acceso de Radio Terrestre Evolucionada.
FDD: Multiplexación por División de Frecuencia.
FDMA: Acceso Múltiple por División de Frecuencia.
GERAN: Red de Acceso de Radio GSM EDGE.
GGSN: Nodo que soporta la puerta de salida en un red GPRS.
GPRS: Servicio General de Paquetes vía Radio.
GSM: Sistema Global para las Comunicaciones Móviles.
GTP: Protocolo de túnel de GPRS.

GW: Nodo de compuerta.

HARQ: Solicitud de Repetición Automática Híbrida.

HLR: Registro de Ubicación Base.

HSPA: Acceso de Paquetes a Alta Velocidad.

HSS: Home Subscriber Server.

IEEE: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos

IM: Margen de Implementación.

IMSI: Identidad

Internacional del Abonado a un Móvil.

IMT: Telecomunicaciones Móviles Internacionales.

INEI: Instituto Nacional de Estadística e Informática.

IP: Protocolos de Internet.

LTE: Evolución a largo plazo

MAC: Control de acceso al medio.

MBMS: Multimedia Broadcast Multicast Service.

MIMO: Múltiple entrada múltiple salida

MIPv4: Protocolo de movilidad en IPv4.

MIPv6: Protocolo de movilidad en IPv6.

MME: Entidad de gestión de movilidad.

MPLA: Máxima Pérdida Permitida en el Enlace

MPT: Microwave Packet Terminal.

MTC: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

NAK: Acuse de recibido negativo.

NAS: Non Access Stratum.

NB: Nodo B

NF: Figura de Ruido.

O&M: Operación y mantenimiento.

OFDMA: Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal.

OPEX: Gastos operativos.

PBI: Producto Bruto Interno.

PCC: Policy and Charging Control

PCRF: Policy and Charging Rules Function

PDCCP: Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos.

PDN: Red de Paquetes de Datos

PDU: Unidad de protocolos de Datos

PEA: Población Económicamente Activa.

PNAF: Plan Nacional de Asignación de Frecuencias

PRB: Bloque de Recurso Físico.

PYME: Pequeñas y Medianas Empresas.

QAM: Modulación de amplitud en cuadratura.

QoS: Calidad y servicio.

QPSK: modulación por desplazamiento de fase en cuadratura

RAN: Red de acceso de radio.

RLC: Control de enlace de radio.

RNC: Controlador de la red de radio

RRC: Control de recursos de radio

RS: Señales de referencia.

SAE: Arquitectura del sistema evolucionada.

SC-FDMA: Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Simple.

SCH: Señales de sincronismo

SDU: Unidad de Protocolos de Servicios.

SGSN: Serving GPRS Support Node.

S-GW: Serving Gateway.

SIB: System Information Block.

SINR: Relación Señal a Ruido e Interferencia.

SNR: Relación Señal a Ruido.

TCP: Protocolo de Control de Transmisión.

TDD: Multiplexación por División de Frecuencia.

TDMA: Acceso Múltiple por División de Tiempo.

TM: Modo Transparente.

UDP: User Datagram Protocol.

UE: Equipo de usuario

UIT – R: Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector de Radiocomunicaciones.

UL: Enlace de subida.

UM: Modo de no reconocimiento.

UMB: Ultra Mobile Broadband.

UMTS: Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles.

UTRAN: Red de Acceso Radio Terrestre UMTS

Uu: Interfaz de radio entre el equipo terminal y el eNB.

VAN (Valor Actual Neto)

VoIP: Voz sobre IP

VPN: Red privada virtual.

WAN: Red de Área Amplia

WAP: Protocolo de Aplicaciones Inalámbricas.

WCDMA: Acceso múltiple por división de código de banda ancha.

WLAN: Red de Área Local Inalámbrica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Página URL <http://www.itu.int/itu-news/issue/2001/03/imt-2000-es.html>
- [2] Christian Geovanny Hurtado Ati, “Estudio de la factibilidad para la implementación de LTE en el Ecuador”, Escuela Politécnica Nacional – Ecuador, 2011.
- [3] Walter Marco Antonio Salcedo Aliaga, “Implementación de una red de tercera generación en la provincia de Tayacaja”, Universidad Nacional de Ingeniería – Perú, 2011.
- [4] Revista Digital Científica y Tecnológica e-GNISIS, “Redes celulares de tercera generación: cdma200 y WCDMA”, Universidad de Guadalajara – México, 2005.
- [5] Stefania Sesia, “LTE The UMTS Long Term Evolution”, 2009.
- [6] Ramón Agusti, “LTE Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles”, 2010.
- [7] 3GPP TSG-RAN WG2, “LTE-Advanced Radio Layer 2 and RRC aspects”.
- [8] 3GPP TS 36.300 V10.1.0 (2010-09), “Evolved Universal Terrestrial Radios Access (E-UTRAN): Overall description”.
- [9] Harri Holma and Anti Toskala, “LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access”, 2009”.
- [10] Erik Dahlman, “3G Evolution HSPA and LTE for Mobile Broadband”, First edition 2007.
- [11] Pierre Lescuyer, “Evolved Packet System (EPS)”, 2008.
- [12] Información obtenida del proveedor Huawei, “LTE Camino al futuro”.
- [13] 3GPP TS 36.101 V9.4.0 (2010-06), “User Equipment (UE) radio transmission and reception”.
- [14] Farooq Khan, “LTE for 4G Mobile Broadband”, 2009.
- [15] Página URL <http://www.inei.gob.pe>, “Producto interno departamental 2009”.
- [16] Página URL <http://www.inei.gob.pe>, “Censo Nacional 2007”
- [17] Página URL <http://www.inei.gob.pe>, “Encuesta Nacional de hogares 2009”.

- [18] Página URL <http://www.inei.gob.pe>, “Censo Nacional Económico 2008”.
- [19] Página URL <http://www.osiptel.gob.pe>.
- [20] Diógenes Marcano, “Dimensionamiento de redes móviles”, PUCP – Perú, 2011.
- [21] Página URL <http://personal.telefonica.terra.es/web/vr/erlang/index.htm>
- [22] Información obtenida de la empresa América Móvil Perú SAC.
- [23] Información obtenida del proveedor Alcatel-Lucent.
- [24] Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- [25] Información obtenida del proveedor Nokia Siemens Networks.