



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ESTUDIO Y SIMULACIÓN DE COBERTURA VOLTE MEDIANTE DISEÑO
DE LINK BUDGET PARA RED 4G LTE DE ENTEL EN SANTIAGO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

ALEXIS ANDRÉS APABLAZA DE LA CUADRA

PROFESOR GUÍA:
JAVIER SANTA ANA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
NAZRE EL HUREIMI FACUSE
PATRICIO VALENZUELA CANO

SANTIAGO DE CHILE

2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: ALEXIS ANDRÉS APABLAZA DE LA CUADRA
FECHA: 16/10/2017
PROF. GUÍA: SR. JAVIER SANTA ANA

ESTUDIO Y SIMULACIÓN DE COBERTURA VOLTE MEDIANTE DISEÑO DE LINK BUDGET PARA RED 4G LTE DE ENTEL EN SANTIAGO

Entel S.A., la mayor empresa de telecomunicaciones móviles de Chile, requería evaluar el impacto que tendría la incorporación del servicio Voice Over LTE (VoLTE) en su red 4G de datos, en Santiago, con el fin de estimar la inversión requerida en el caso de que existiera disminución de cobertura del servicio.

Dado lo anterior, el objetivo del presente trabajo de título se enfocó en determinar el área de cobertura que tendrá la actual red 4G de Entel al incorporar el servicio VoLTE. Para llevar a cabo esta tarea se diseñó un *Link Budget* de VoLTE, el cual se utilizó posteriormente para determinar los puntos de corte en simulaciones que se realizaron en el programa Mentum Planet. De esta forma, se comparó la cobertura de la red de datos (*Best Effort*) con la cobertura VoLTE.

La metodología utilizada en el desarrollo de la presente memoria comprendió la investigación y el análisis de redes móviles LTE, desarrollando y plasmando en el segundo capítulo, una base teórica que permite un amplio y fácil entendimiento de éstas para cualquier persona. Posteriormente, comprendió el diseño del *Link Budget* de VoLTE, el cuál fue generado en un documento Excel, otorgando de esta forma una herramienta sencilla y útil al área de optimización de redes de acceso de Entel. El trabajo concluyó con la realización de sets de simulaciones en el programa solicitado, con lo que se obtuvo los porcentajes de cobertura asociados tanto a la red *Best Effort* como al servicio VoLTE, para las bandas de frecuencia de 2600 MHz y 700 MHz.

Entre los principales resultados del presente trabajo, cabe destacar:

1. Disminución aproximada de un 7.5% de cobertura para el servicio VoLTE en comparación a la cobertura del servicio de datos Fourth Generation of Wireless Telephone Technology (4G), para la banda 2600 MHz, considerando Reference Signal Received Power (RSRP) de corte sin *fading*.
2. Disminución aproximada de un 19% de cobertura para el servicio VoLTE en comparación a la cobertura del servicio de datos 4G, para la banda 700 MHz, considerando RSRP de corte sin *fading*.
3. Se confirma la importancia del *feature* TTI Bundling para mejorar la cobertura del enlace ascendente, estableciendo una mejora entre un 20 y un 25% en la cobertura.

Como consecuencia final, el presente trabajo entrega a Entel una cuantificación de la cobertura esperada, así como un conjunto de recomendaciones para la implementación del servicio VoLTE, y de ésta forma, pasar a la etapa de evaluación económica para la implementación definitiva del proyecto.

Dedicado a mi familia, polola, y amigos.

Agradecimientos

Gracias a toda mi familia por apoyarme siempre, enseñarme a ser una buena persona, darme amor y brindarme apoyo incondicional. En especial a mi madre, Claudia de la Cuadra, y a mi hermanita querida, Nathalie Tuteleers. «Las quiero»

Gracias Emiliana Pinto, por estar conmigo y apoyarme en los momentos más duros de mi vida.

Gracias a todos mis amigos (universidad, colegio y de concepción), quienes son una parte muy importante de mi vida y que estimo muchísimo.

Gracias a mi padrino, Nibaldo Foix, por estar tan presente en mi vida y por apoyarme para terminar mi memoria.

Gracias a mis profesores y compañeros de universidad, con quienes compartí y aprendí mucho.

Gracias a mis compañeros de trabajo de Entel, en especial a Roberto Carvajal y Javier Santa Ana, quienes me guiaron y apoyaron en mi memoria.

Finalmente, gracias Dios por darme esta vida y estar presente en ella.

Tabla de Contenido

Introducción	1
1. Presentación	2
1.1. Motivación	2
1.2. Problema	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Alcances y limitaciones	3
1.4.1. Alcances	3
1.4.2. Limitaciones	4
1.5. Metodología de trabajo	5
1.6. Estructura de la memoria	5
2. Antecedentes	6
2.1. Evolución de las Redes Móviles	6
2.1.1. Primera Generación (1G)	6
2.1.2. Segunda Generación (2G)	7
2.1.3. Tercera Generación (3G)	8
2.1.4. Cuarta Generación (4G)	9
2.1.5. Quinta Generación (5G)	9
2.2. Arquitectura de Red 4G LTE	11
2.2.1. Red de Acceso de Radio (RAN)	13
2.2.2. Interfaces E-UTRAN	14
2.2.3. Evolución del Core de Paquetes (EPC)	16
2.2.4. Interfaces EPC	19
2.2.5. Subsistema Multimedia (IMS)	20
2.3. Capa Física	24
2.3.1. Radio Enlace	24
2.3.2. Frame LTE y Physical Resource Block (PRB)	25
2.3.3. Canales	28
2.3.4. Arreglo de Múltiples Antenas - MIMO	32
2.4. Gestión de Sesiones	34
2.4.1. Servicios Portadores (Bearers)	34
2.4.2. Identificaor de Clase de QoS (QCI)	36
2.5. Voz sobre LTE (VoLTE)	37

2.5.1.	¿Qué es VoLTE?	37
2.5.2.	Ventajas y Desventajas de VoLTE	38
2.5.3.	Requerimientos y Recomendaciones para VoLTE	40
2.5.4.	Llamada VoLTE	41
2.5.5.	Otros Mecanismos de Llamadas	42
2.5.6.	Features de VoLTE	45
2.6.	Link Budget	50
2.6.1.	Link Budget en LTE	51
2.6.2.	Consideraciones para el Link Budget de VoLTE	55
3.	Metodología	56
3.1.	Dimensionamiento VoLTE	56
3.1.1.	Codec de Audio	56
3.1.2.	Indicador de Calidad del Canal (CQI)	58
3.1.3.	Tamaño del paquete VoLTE	59
3.2.	Diseño Link Budget de VoLTE	61
3.2.1.	Simplificaciones consideradas	63
3.2.2.	nPRB	64
3.2.3.	Total Tx Power per PRB	65
3.2.4.	Antenna Gain	66
3.2.5.	Feeder Losses	67
3.2.6.	EIRP	68
3.2.7.	Thermal Noise Density	69
3.2.8.	Rx Noise Figure	70
3.2.9.	Noise Floor per PRB	70
3.2.10.	Antenna Diversity Gain	71
3.2.11.	VoLTE Gain Features	72
3.2.12.	Target SINR	73
3.2.13.	Interference Margin (IM)	77
3.2.14.	Body Loss Margin	78
3.2.15.	Rx Sensitivity	78
3.2.16.	Log-Normal Fading Margin (LNF)	79
3.2.17.	Building Penetration Margin	79
3.2.18.	Total Margins	80
3.2.19.	MAPL - Maximum Allowable Path Loss	80
3.3.	Resumen y Comparación de Link Budgets VoLTE	81
3.3.1.	Tabla Resumen de diseño Link Budget	81
3.3.2.	Cálculo de RSRP para simulaciones	81
3.3.3.	Comparación Diseño Link Budget VoLTE	83
4.	Simulaciones	88
4.1.	Descripción del Software	88
4.2.	Hardware Utilizado y Especificaciones la Red	90
4.2.1.	Hardware Utilizado	90
4.2.2.	Datos y Configuraciones de la Red LTE de Entel	90
4.2.3.	Área Simulada	92
4.3.	Set de Simulaciones	93

4.3.1. Primer Set de Simulación: Estudio de TTI Bundling	95
4.3.2. Segundo Set: Cobertura Datos vs VoLTE - 2600 MHz	99
4.3.3. Tercer Set: Cobertura Datos vs VoLTE - 700 MHz	103
4.3.4. Cuarto Set: Cobertura Datos vs VoLTE - Cobertura Conjunta	107
4.4. Análisis General de los Resultados de Simulaciones	111
5. Conclusiones y Recomendaciones para Entel	113
5.1. Conclusiones	113
5.2. Recomendaciones para Entel	114
5.3. Trabajos Futuros	115
Acrónimos	116
Bibliografía	122
ANEXOS	128
ANEXO A: Modelos de Propagación	128
ANEXO B: Resumen Simulaciones con RSRP puro (sin márgenes)	130

Índice de Tablas

2.1. Resumen generaciones celulares 1G a 4G	9
2.2. Tipos de requerimientos (<i>Requests</i>) SIP	22
2.3. Tipos de códigos de respuesta SIP	23
2.4. Número de PRBs y subportadoras dado el Ancho de Banda en LTE	27
2.5. Parámetros QCI [40]	36
2.6. LTE Link Budget Simplificado	52
3.1. Tabla de AMR-NB <i>codecs</i>	57
3.2. Tabla de AMR-WB <i>codecs</i>	57
3.3. Características de los niveles de CQI para red LTE	58
3.4. Tamaño (bits) del bloque de transporte	60
3.5. Variables consideradas en el cálculo del Link Budget	61
3.6. nPRB asignados	64
3.7. Potencia Transmisor por PRB	65
3.8. Ganancia de Antenas	66
3.9. Pérdidas del Alimentador	67
3.10. Valores calculados para EIRP	68
3.11. Ruido termal por PRB	69
3.12. Figura de Ruido	70
3.13. Piso de ruido por PRB	70
3.14. Tabla 8 documento <i>vendor</i> actual - Ganancias de diversidad para Uplink	71
3.15. Tabla 9 documento <i>vendor</i> actual - Ganancias de diversidad para Downlink	71
3.16. Ganancias de Diversidad de Antena	71
3.17. Ganancias por <i>features</i> opcionales VoLTE	72
3.18. UL SINR objetivo sin y con TTI Bundling - Libro	75
3.19. UL SINR objetivo con TTI Bundling - 3GPP	75
3.20. Extracto tabla <i>vendor</i> actual - Uplink SINR con TTI Bundling	76
3.21. Extracto tabla <i>vendor</i> actual - Downlink SINR	76
3.22. Resumen valores SINR	77
3.23. Margen de Interferencia	77
3.24. Pérdidas de cuerpo	78
3.25. Sensibilidad del Receptor por PRB	78
3.26. Margen de penetración de desvanecimiento	79
3.27. Margen de penetración de edificaciones	80
3.28. Margen total	80
3.29. Máxima pérdida de trayecto	81

3.30. Resumen de diseño Link Budget VoLTE	81
3.31. Resumen Link Budget y Valores RSRP de Corte	83
3.32. Resumen valores RSRP VoLTE y RSRP Best Effort Entel	83
3.33. Comparación Link Budgets VoLTE en banda 2600 MHz	85
3.34. Comparación Link Budgets VoLTE en banda 700 MHz	86
4.1. Características del Hardware Utilizado para Simular	90
4.2. Configuración de la red LTE previamente cargados por Entel	90
4.3. Configuración de suscriptores previamente cargada por Entel	91
4.4. Datos incorporados como servicio VoLTE	93
4.5. Parámetros del Primer Set de Simulaciones	95
4.6. Resultados Simulación Cobertura TTI Bundling - 2600 MHz	97
4.7. Resultados Simulación Cobertura TTI Bundling - 700 MHz	97
4.8. Parámetros 2do Set de Simulaciones - BE 2600 MHz	99
4.9. Parámetros 2do Set de Simulaciones - VoLTE 2600 MHz	100
4.10. Resultados Comparación Cobertura BE vs VoLTE - 2600 MHz Downlink . .	101
4.11. Resultados Comparación Cobertura BE vs VoLTE - 2600 MHz Uplink	102
4.12. Parámetros 3er Set de Simulaciones - BE 700 MHz	103
4.13. Parámetros 3er Set de Simulaciones - VoLTE 700 MHz	104
4.14. Resultados Comparación Cobertura BE vs VoLTE - 700 MHz Downlink . . .	105
4.15. Resultados Comparación Cobertura BE vs VoLTE - 700 MHz Uplink	106
4.16. Parámetros del Primer Set de Simulaciones	107
4.17. Parámetros del Primer Set de Simulaciones	108
4.18. Resultados Comparación Cobertura BE vs VoLTE - Downlink	109
4.19. Resultados Comparación Cobertura BE vs VoLTE - Uplink	110
5.1. Resumen de Simulaciones SIN y CON considerar el margen de LNF	130

Índice de Ilustraciones

1.1. Limitación geográfica para simulaciones	4
2.1. Terminales móviles de primera generación (analógicos)	7
2.2. Fundamentos de 5G [5]	10
2.3. Arquitectura genérica 3GPP	11
2.4. Arquitectura completa de 2G (GERAN) a 4G (EUTRAN)	12
2.5. Red LTE: E-UTRAN y EPC	16
2.6. Modelo de provisión de servicios en base al subsistema IMS	20
2.7. Arquitectura simplificada del subsistema IMS	21
2.8. OFDMA y SC-FDMA	25
2.9. Composición de un Frame LTE FDD	26
2.10. Composición de un Frame LTE TDD	26
2.11. Composición de un PRB	27
2.12. Canales	28
2.13. Canales Físicos en un RB - Downlink	30
2.14. Señales de Referencia (RS) en un RB	30
2.15. Canales Físicos en un RB - Uplink	31
2.16. Configuraciones de Antenas: SISO, SIMO, MISO, MIMO	32
2.17. <i>Bearers</i> en una red LTE	34
2.18. Llamada VoLTE con señalización SIP	41
2.19. CS-Fallback	42
2.20. SRVCC	44
2.21. ROHC	45
2.22. Segmentación RLC en conjunto con Agrupación TTI	46
2.23. TTI Bundling	47
2.24. Paquete VoIP con RoHC+RLC+TTI Bundling	48
2.25. Modos Intra e Inter <i>Frequency Hopping</i>	49
2.26. <i>Frequency Hopping</i> tipo 1 (celeste) y tipo 2 (verde)	49
2.27. Visualización de un Link Budget	50
2.28. LTE Uplink Link Budget	51
2.29. LTE Downlink Link Budget	51
3.1. Plantilla Excel generada con diseño de Link Budget VoLTE	62
3.2. Ganancia de antenas no isotrópicas	66
3.3. Componentes generales de un sistema de antena	67
3.4. Representación gráfica del EIRP	68

3.5. Hoja de calculo RSSI-RSRP	82
4.1. Logo Software Mentum Planet	88
4.2. Ejemplos con modelos 3D de Mentum Planet	89
4.3. Área de Simulación y Edificios Santiago	92
4.4. Menú <i>Subscriber</i> de Mentum Planet	93
4.5. Menú <i>Subscriber</i> de Mentum Planet	94
4.6. Menú <i>Subscriber</i> de Mentum Planet	94
4.7. Resultado gráfico de simulación TTI Bundling en banda 2600 MHz	96
4.8. Resultado gráfico de simulación TTI Bundling en banda 700 MHz	98
4.9. Sitios LTE 2600 MHz en Santiago	100
4.10. Cobertura BE vs VoLTE para banda 2600 MHz Downlink	101
4.11. Cobertura BE vs VoLTE para banda 2600 MHz Uplink	102
4.12. Sitios LTE 700 en Santiago	104
4.13. Cobertura BE vs VoLTE para banda 700 MHz Downlink	105
4.14. Cobertura BE vs VoLTE para banda 700 MHz Uplink	106
4.15. Sitios LTE 2600 y 700 MHz en Santiago	108
4.16. Comparación Cobertura BE vs VoLTE - Downlink	109
4.17. Comparación Cobertura BE vs VoLTE - Uplink	110

Introducción

La comunicación es una de las bases más importantes en una sociedad civilizada, en la que las personas se relacionan y utilizan el lenguaje verbal para expresarse. Actualmente las telecomunicaciones son de vital importancia, ya que gracias a ellas se eliminan las barreras geográficas, permitiendo que una persona se comunique con otra ubicada en el otro extremo del mundo en apenas unos pocos segundos. En particular, un subconjunto de las telecomunicaciones destaca por el tipo de servicio que brinda: las redes móviles. Estas se caracterizan por brindar comunicación a usuarios estáticos y móviles, facilitando el acceso a la información en todo momento mediante conexión a Internet desde cualquier punto, siempre y cuando exista cobertura.

En el universo de las redes móviles, un celular es un dispositivo electrónico móvil cuya función es comunicar a sus usuarios desde cualquier lugar, en la medida que exista cobertura. El celular aporta libertad de movimiento, mayor privacidad en las comunicaciones, seguridad personal, entrega entretenimiento, sirve como cámara fotográfica y/o de video, además de ser una herramienta que permite mantener conectado a los usuarios con el mundo.

Durante la primera década del nuevo milenio, el diseño del teléfono móvil adquirió dimensiones físicas lo suficientemente acotadas como para alojarse sin estorbo en el bolsillo de un pantalón o chaqueta, o en un bolso pequeño: la movilidad y peso de los celulares ha contribuido al cómodo manejo, llegando a ser considerado uno de los objetos imprescindibles de la vida cotidiana moderna.

Año a año los usuarios de telefonía móvil generan más tráfico de datos y con mayores requerimientos de velocidad. Esto requiere una constante actualización de las redes móviles, para responder a las crecientes demandas. En la actualidad, Chile está en proceso de despliegue de redes 4G LTE, aumentando la capacidad brindada a los usuarios y sus velocidades de tráfico. Sin embargo, las redes 4G, a diferencia de las redes 2G y 3G, no poseen conmutación de circuito por lo que sólo pueden operar llamadas sobre paquetización IP, es decir, mediante llamadas VoIP. En este contexto, VoLTE ha sido la tecnología adoptada globalmente dada sus ventajas al asegurar un nivel de calidad de servicio (QoS) durante las llamadas, mejorando el rendimiento de una llamada de voz por sobre las generaciones móviles anteriores.

Capítulo 1

Presentación

1.1. Motivación

Entel S.A., la mayor empresa de telecomunicaciones móviles de Chile, busca estar a la altura de las nuevas exigencias de los usuarios, incorporando nuevas tecnologías a su red. De ésta forma la empresa desea implementar VoLTE en el mediano plazo sobre su red 4G LTE existente (bandas 2600 y 700 MHz).

Entel desea estudiar el impacto en la cobertura que brinda a sus usuarios en la red 4G LTE al activar el servicio VoLTE, ello con el objetivo futuro de poder establecer si la reducción de cobertura requiere nueva inversión en infraestructura de acceso de radio, es decir, nuevas estaciones bases. Para ello solicita al memorista realizar un *link budget* de VoLTE, y posteriormente simular en la red de Entel, para determinar la nueva cobertura que se tendrá.

1.2. Problema

VoLTE garantiza un nivel de Quality of Service (QoS) a los usuarios durante una llamada de voz, requiriendo mejores niveles de señal que la red de datos, garantizando un *bit rate* dado (Guaranteed Bit Rate (GBR)). Dadas estas características, tanto la cobertura como la capacidad cambian respecto a lo calculado para la red LTE de datos (*Best Effort*). Luego, se requiere realizar un nuevo cálculo de cobertura para VoLTE, mediante el diseño de un *Link Budget*, y su posterior validación a través de simulaciones.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo general de la presente memoria es determinar la cobertura con servicio VoLTE que se tendría sobre la red 4G LTE existente de ENTEL, en la ciudad de Santiago de Chile. Para ello se solicita el diseño de un *Link Budget* de VoLTE.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar un estudio teórico sobre la tecnología móvil Long Term Evolution (LTE) y VoLTE, plasmando los aspectos primordiales de estos para su entendimiento.
- Simular cobertura VoLTE sobre la red 4G existente de Entel, en base a *Link Budget* diseñado previamente, y comparar con la cobertura de datos actual (*Best Effort*), para la ciudad de Santiago
- Entregar recomendaciones de variables asociadas a *Link Budget* de cobertura VoLTE en función de requerimientos de ENTEL, para su futuro despliegue.

1.4. Alcances y limitaciones

1.4.1. Alcances

- Estudio de tópicos asociados a redes móviles y su evolución.
- Estudio macro y detallado de tecnologías LTE y VoLTE, indicando protocolos e interfaces de forma superficial.
- Diseño de *link budget* basado en el formato del *vendor* existente a la fecha¹, adoptando recomendaciones del 3GPP y de una destacada empresa consultora internacional contratada por Entel².
- Simulación y comparación de cobertura LTE para red de datos y VoLTE de Entel.
- Los estudios basados en documentación 3GPP serán consultados del último *release* estable a la fecha, esto es, *release* 12.

¹Desde este punto al *vendor* existente a la fecha se le denominará como *Vendor Actual*.

²A partir de este punto a la empresa consultora de VoLTE se le denominará como *Consultor VoLTE*

1.4.2. Limitaciones

- Entel entregará al alumno todas las herramientas (*hardware* y *software*) requeridos para la realización de su memoria.
- Todos los trabajos serán ejecutados en la zona denso-urbana de la región metropolitana, en el polígono conformado por las comunas de Quilicura, La Dehesa, Puente Alto, San Bernardo y Maipú (figura 1.1).
- El estudio de características (*features*) VoLTE estará acotado por las características implementadas por el *vendor* actual para la red de Entel.

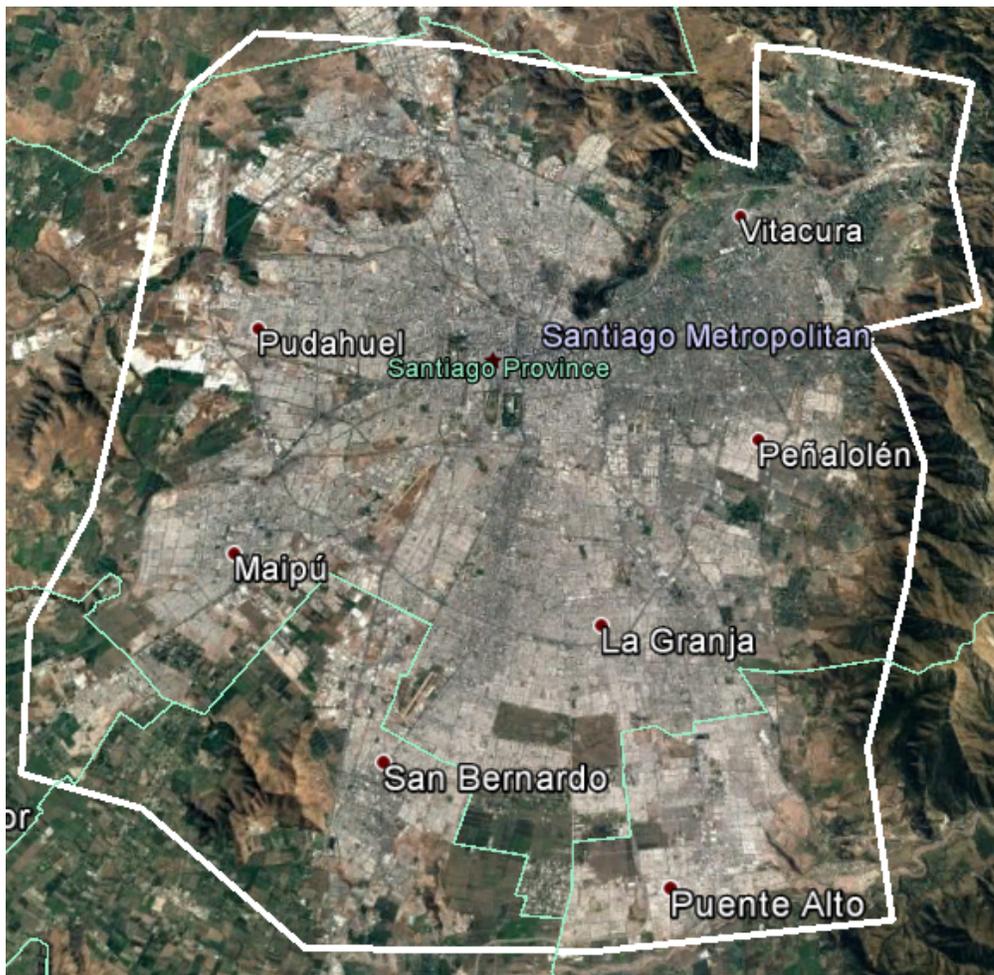


Figura 1.1: Limitación geográfica para simulaciones

1.5. Metodología de trabajo

En una primera etapa, se analizará la teoría de la tecnología LTE, para entender su funcionamiento y así poder contrastar con la red LTE existente de Entel. Posteriormente se realizará un estudio teórico de la tecnología VoLTE, con la finalidad de comprender todas las variables necesarias para el diseño de un *Link Budget*. En una siguiente etapa, se diseñará el *Link Budget* de cobertura VoLTE, explicando y detallando las variables involucradas para su cálculo. Se continuará con un periodo de aprendizaje del *software* de simulación Mentum Planet (programa de la empresa InfoVista, utilizado por Entel para sus simulaciones de red móvil), para luego simular la nueva cobertura VoLTE en base al *Link Budget* diseñado en etapa anterior. Posteriormente se presentará de forma gráfica los principales resultados de las simulaciones. Finalmente se procederá a comparar los resultados obtenidos de las simulaciones con la red *Best Effort* de Entel, entregando conclusiones y recomendaciones respecto a la implementación VoLTE.

1.6. Estructura de la memoria

A continuación se describen las principales temáticas de los siguientes capítulos de la presente memoria.

En el Capítulo 2 (Antecedentes), se estudia y presenta el estado del arte y los fundamentos teóricos sobre los que el presente trabajo de título se basa. En este capítulo, se observa la evolución de las redes móviles, se muestra la arquitectura 4G LTE, se describe VoLTE, y se describe la composición del *Link Budget*.

En el Capítulo 3 (Metodología), se detalla el diseño del *Link Budget* de VoLTE para la red 4G LTE de ENTEL, y se compara con el *Link Budget* utilizado por Entel para su red 4G de datos.

En el Capítulo 4 (Simulaciones), se describe en detalle la preparación y realización de las simulaciones en el programa Mentum Planet, especificando las variables y valores utilizados. Se especifica además las características del *hardware* empleado para simular.

En el capítulo 5 (Resultados), se presentan los resultados de las simulaciones realizadas, mostrando gráficamente las diferencias entre cobertura VoLTE simulada, y la cobertura de datos existente.

El capítulo 6 (Conclusiones), se exponen las discusiones y conclusiones del trabajo en base a los resultados obtenidos anteriormente. Se finaliza el documento con las posibles futuras líneas de investigación derivadas del presente tema.

Capítulo 2

Antecedentes

El presente capítulo expone los antecedentes y bases teóricas que sustentan los tópicos abarcados por esta memoria. Se inicia con un resumen de la evolución de las redes móviles, revisando las cuatro generaciones de telefonía móvil existentes hasta la actualidad. Luego se presenta en detalle la arquitectura de una red de telefonía móvil 4G LTE y las interfaces que se utilizan. Posteriormente se presenta el *core* IP Multimedia Subsystem (IMS) y los principales factores de calidad de servicio (QoS). Se finaliza con las principales características de VoLTE y la base teórica del *Link Budget*.

2.1. Evolución de las Redes Móviles

Desde que el primer servicio comercial de telefonía móvil apareciera en el año 1946 en EEUU, la industria de redes móviles ha experimentado importantes avances. En particular, se pueden distinguir claramente cuatro generaciones de telefonía móvil, las cuales se detallan a continuación.

2.1.1. Primera Generación (1G)

La primera generación de telefonía celular (First Generation of Wireless Telephone Technology (1G)) se caracterizó por normas y estándares de telecomunicaciones analógicos, los cuales soportaban únicamente servicios básicos de voz. Su desarrollo comenzó a finales de 1970, siendo Japón, en 1979, quien desplegara en Tokio la primera red de telefonía móvil en el mundo. Existieron diversos estándares, sin embargo los más destacados fueron [1]:

- Nordic Mobile Telephones (NMT): implementado en Europa en 1981 con especificaciones NMT-450 y NMT-900, utilizando las bandas de frecuencia de 450 MHz y 900 MHz respectivamente. Fue el primero en prestar servicio de *roaming* Internacional.
- Advanced Mobile Phone Service (AMPS): desarrollado por los laboratorios Bell. Fue

desplegado en 1983 en EEUU. Utilizó la banda de los 800 MHz, se destacó por funcionar con Frequency Division Multiple Access (FDMA) y por utilizar el concepto de células (*cells*) para representar las celdas de transmisión y recepción en las estaciones bases.

Las celdas de los sistemas 1G eran grandes y no utilizaban el espectro radioeléctrico de forma eficiente, por lo que su capacidad era muy pequeña. Conjuntamente, los dispositivos móviles eran grandes, pesados y costosos, y debían utilizar altas potencias para transmitir por lo que su batería se consumía velozmente. Sumado a lo anterior, la señal de aire estaba afecta al ruido, no poseía cifrado alguno, y el diseño de la red era complicado y caro. Dado los altos costos, la primera generación fue utilizada por un segmento acotado, quienes tenían un alto poder adquisitivo [2].



Figura 2.1: Terminales móviles de primera generación (analógicos)

2.1.2. Segunda Generación (2G)

La gran cantidad de estándares incompatibles entre sí que existió en la primera generación gatilló la creación de un estándar mancomunado. Dicha tarea fue encomendada a la Comisión Europea, quien a principio de la década de los 90s introdujo el estándar Global System for Mobile Communication (GSM), dando inicio a la segunda generación móvil (Second Generation of Wireless Telephone Technology (2G)) [2].

GSM fue basado en Time Division Multiple Access (TDMA) de banda estrecha, e incorporó servicios de llamadas de prepago, *roaming* internacional, y mensajería corta (Short Message Service (SMS)), entre otros, siendo el primer sistema celular digital operado comercialmente (1991). Otros estándares importantes que existieron fueron el D-AMPS (IS-136), el cuál evolucionó posteriormente a Personal Communication Systems (PCS) siendo utilizado en EEUU por un tiempo, CDMAOne (IS-95) posteriormente en EEUU, y Pacific Digital Communications (PDC) en Japón [1].

GSM fue ampliamente implementado en el mundo, teniendo más de mil millones de usuarios en el año 2005. El éxito de 2G se debió en parte al rápido crecimiento de Internet, pues los usuarios comenzaron a descargar datos en sus dispositivos móviles. Esto gatilló que se mejoraran las tecnologías para obtener mejores velocidades de datos, dando paso a la denominada 2.5G.

Los sistemas 2.5G se crearon a partir de 2G mediante la introducción de un núcleo de red en el dominio de la conmutación de paquetes, y la modificación de la interfaz de aire, de forma tal de que pudiera transmitir tanto datos como voz. A medida que éstas tecnologías fueron mejorando en las velocidades de transmisión, se popularizó el término 2.75G para las tecnologías que llegasen a velocidades similares a las establecidas para la tercera generación. Dentro de los sistemas 2.5G y 2.75G, las tecnologías emergentes más destacadas fueron: General Packet Radio Service (GPRS), Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE), y Enhanced GPRS (EGPRS), que es la unión de GPRS con EDGE. Finalmente, tanto GSM como Code Division Multiple Access (CDMA), crearon grupos de trabajo para mejorar estas tecnologías y adoptar los estándares 3G (3rd Generation Partnership Project (3GPP), para GSM y 3rd Generation Partnership Project 2 (3GPP2), para CDMA).

2.1.3. Tercera Generación (3G)

La tercera generación (Third Generation of Wireless Telephone Technology (3G)) surgió como respuesta al problema de saturación del espectro presentada por las tecnologías anteriores, y a la creciente demanda de mayores velocidades de transmisión de datos. De esta forma, en 1999, la International Telecommunication Union (ITU) aprobó el estándar IMT-2000 para redes inalámbricas de tercera generación.

Una gran cantidad de sistemas fueron propuestos para el IMT-2000, sin embargo, sólo CDMA-2000, a cargo del 3GPP2 y desarrollado a partir de IS-95, en conjunto a Universal Mobile Telecommunication System (UMTS), a cargo del 3GPP y desarrollado a partir de GSM, fueron los dos sistemas predominantes, siendo este último ampliamente implementado a nivel mundial. UMTS fue mayormente implementado con tecnología Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) como técnica de acceso al medio, dentro de la cual se puede distinguir dos opciones de duplexación: Frequency Division Duplex (FDD) y Time Division Duplex (TDD), para el manejo de los enlaces ascendentes y descendentes.

El uso dispar de datos entre el enlace de subida (*uplink*) y el de bajada (*downlink*) impulsó cambios en el ancho de banda utilizado para cada uno, dándole prioridad al enlace de bajada para mejorar las velocidades. Esta actualización sobre el radio-enlace supuso el paso al denominado 3.5G, destacando el High Speed Packet Access (HSPA) [2]. En tanto que el 3GPP2 mejoró el CDMA-2000 con el nombre de CDMA-2000 High Rate Packet Data (HRPD) y el Evolution Data Optimized (EV-DO).

La última etapa de esta generación volvió a incrementar las velocidades, esta vez mediante la adición de Multiple Inputs Multiple Outputs (MIMO) y modulaciones de mayor grado, tales como 16-QAM en enlace ascendente y 64-QAM en enlace descendente. Esta tecnología fue denominada HSPA+.

2.1.4. Cuarta Generación (4G)

La cuarta generación (4G) se generó tomando en consideración la necesidad de abaratar los costos para la transmisión de datos, dada las altas velocidades y grandes demandas de datos que los usuarios requerían en servicios multimedia de voz y video. El estándar adoptado fue el de Long Term Evolution Advanced (LTE+), aunque también se consideran 4G las tecnologías Worldwide Interoperability for Microwave Access 2 (WiMAX2).

La característica principal de 4G LTE es que está basado completamente en la arquitectura del protocolo TCP/Internet Protocol (IP), utilizando Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) como método de acceso, permitiendo velocidades teóricas de transmisión de hasta 1 Gbps. Otras características destacables de 4G en comparación a su predecesor 3G son [3, 4]:

- Baja latencia
- Bajo costo por bit
- Movilidad a altas velocidades
- *Roaming* entre distintas redes y tecnologías
- Alta capacidad
- Mejora en la calidad de servicio (QoS)

Cabe destacar que la tecnología LTE no cumple los estándares dados por la ITU para 4G, sin embargo dadas las presiones de la industria de telecomunicaciones, el término 4G fue permitido para tecnologías con menores tasas de transmisión (denominadas por algunos como 3.9G), entre ellas LTE. De ésta forma, se entenderá por “4G real” (de ahora en adelante, simplemente 4G) a tecnologías que cumplan con el International Mobile Telecommunications Advanced Standard (IMT-A), es decir a LTE+ y WiMAX2.

	1G	2G	2.5-2.75G	3G	3.5G	4G	4G+
Velocidad pico de datos teórico	-	-	64 y 236 Kbps	384 Kbps	21 Mbps	300 Mbps	100 Mbps en Mov 1+ Gbps
Estándares	AMPS	CDMA, GSM	GPRS, EDGE	UMTS, CDMA-2000	HSPA, HSPA+, EVDO	LTE	LTE-A
Nuevos Servicios	Voz Analógica	Voz digital, sms, roaming	Datos	Calida de Servicio (QoS)	Video Stream	Video HD, VoLTE, ViLTE	Video UHD, Carrier Aggregation
Multiplexación	FDMA	TDMA/FDMA /CDMA	TDMA/FDMA /CDMA	CDMA/WCDMA	WCDMA	OFDMA	OFDMA
Switching	CS	CS	CS para voz PS para datos	CS para voz PS para datos	CS para voz PS para datos	PS para voz y datos	PS para voz y datos

Tabla 2.1: Resumen generaciones celulares 1G a 4G

2.1.5. Quinta Generación (5G)

La quinta generación de telefonía móvil (Fifth Generation of Wireless Telephone Technology (5G)) no se encuentra definida al momento de escribir esta memoria, y se espera

que la primera versión del estándar se publique el año 2020.

5G se proyectó pensando en el Internet Of Things (IOT) y el lenguaje Machines To Machines (M2M), con un importante incremento en la cantidad de dispositivos conectados a la red. A partir de los documentos y presentaciones de los grupos de trabajo del 3GPP y de la ITU, es posible rescatar algunas características que se esperan para 5G:

- Enfocada en la comunicación entre máquinas (IOT y M2M).
- Muy baja latencia (menor a 1ms)
- Altas velocidades en movilidad
- Uso espectral mucho mejor que 4G
- Mejora de la cobertura
- Gran incremento de los Access Point (AP)
- Gran incremento en la cantidad de dispositivos conectados a la red
- Velocidad esperada de 10 Gbps en baja movilidad

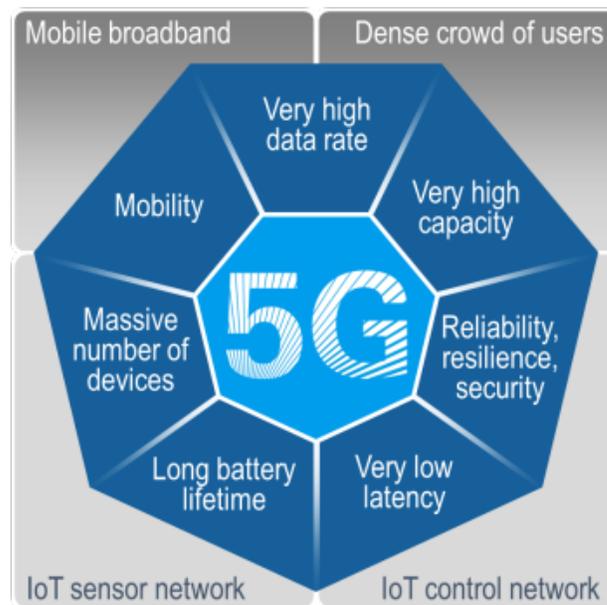


Figura 2.2: Fundamentos de 5G [5]

2.2. Arquitectura de Red 4G LTE

En toda red de comunicaciones móviles celular (2G, 3G y 4G), se puede distinguir tres componentes básicos:

- **User Equipment (UE):** El Equipo de Usuario es el dispositivo móvil que permite al usuario acceder a los servicios de red. Típicamente posee una tarjeta inteligente (Universal Integrated Circuit Card (UICC)) que permite la identificación del usuario en la red. La conexión con la red se realiza mediante una interfaz de radio.
- **Radio Access Network (RAN):** La Red de Acceso se encarga de proveer los servicios de transmisión (datos, voz y señalización), para establecer conectividad entre los equipos de usuarios y la red troncal. La RAN está encargada de gestionar los recursos de radio disponibles, con el fin de optimizar los servicios portadores. La Red de Acceso está conformada por la Radio Base y por los equipos Controladores de Radio Bases.
- **Core Network (CN):** La Red Troncal es la encargada de gestionar la identificación del usuario con la base de datos, gestionar la movilidad de los usuarios, gestionar las sesiones de datos o transporte de información, establecer los mecanismos de interconexión con otras redes, entre otros. La red troncal está formada por equipos que realizan conmutación de circuitos, conmutación de paquetes, bases de datos, *gateways*, entre otros.

Esta arquitectura de red se ajusta a los sistemas 3GPP [6], como se puede visualizar en la figura 2.3 [3].

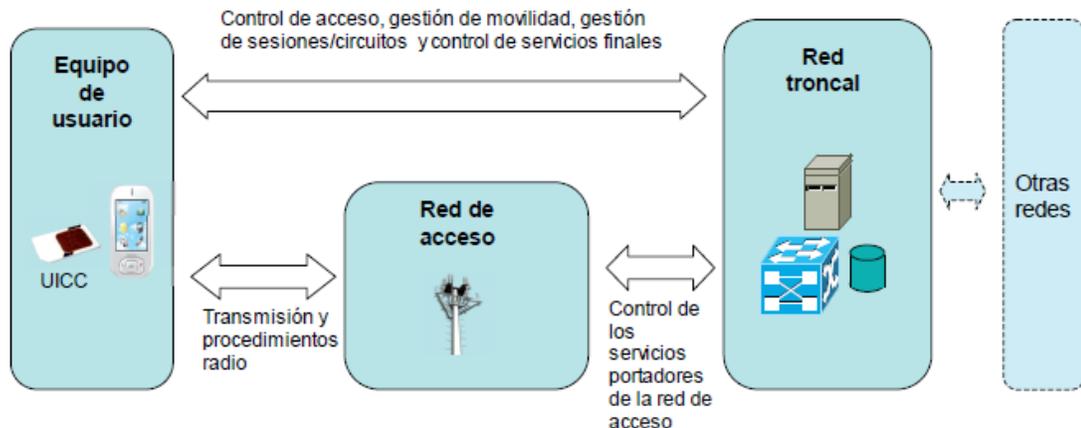


Figura 2.3: Arquitectura genérica 3GPP

En el caso particular de la red 4G LTE, esta presenta tres elementos fundamentales: la red de acceso Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), la red troncal Evolved Packet Core (EPC), y la plataforma de servicios multimedia IMS. Tanto la red de acceso como la red core de LTE están diseñadas para la transferencia de información basada en paquetes IP, dejando de lado la conmutación de circuitos.

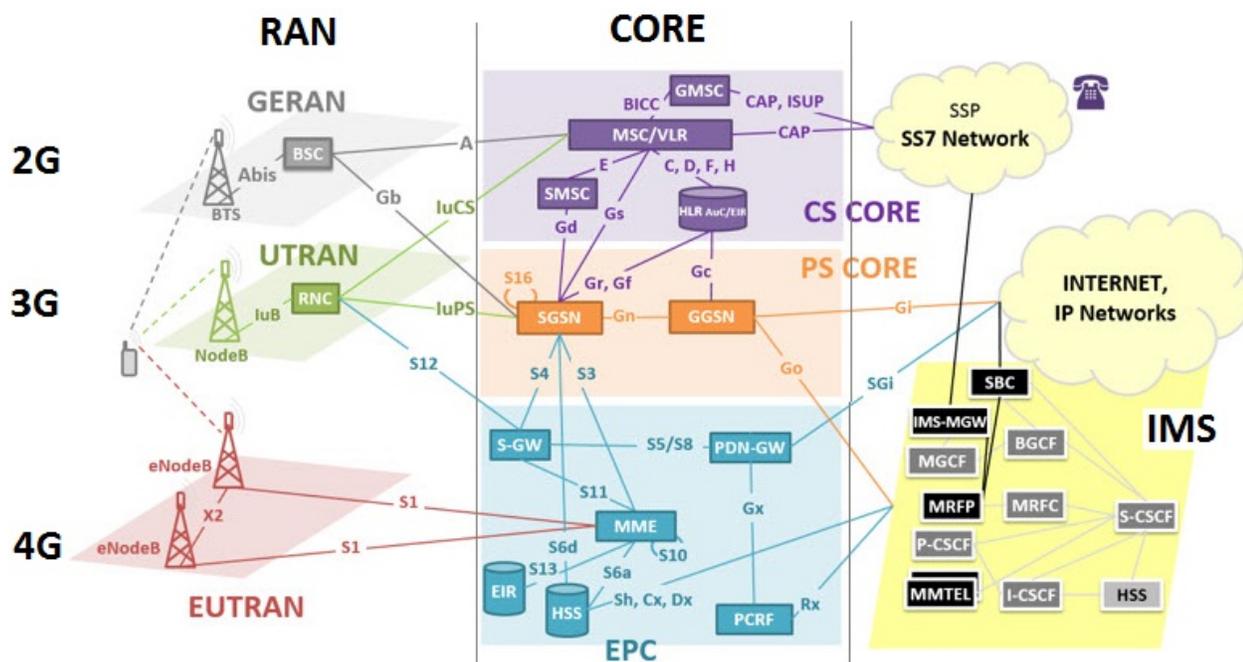


Figura 2.4: Arquitectura completa de 2G (GERAN) a 4G (EUTRAN)

En la figura 2.4, se puede visualizar la arquitectura completa de las redes 2G, 3G y 4G [7]. Se aprecia que tanto las redes 2G como 3G poseen un núcleo de circuitos conmutados Circuit Switching (CS), el cual se ocupa de gestionar las llamadas de voz, y un segundo núcleo de conmutación de paquetes Packet Switching (PS), el cual gestiona la transmisión de datos entre el usuario y la red. En contraste, 4G sólo posee un núcleo de conmutación de paquetes (núcleo EPC), por lo que, de no contar con llamadas por IP (Voice Over IP (VoIP) - VoLTE), una llamada en 4G deberá pasar a 3G o 2G para ser atendida por el núcleo de conmutación de circuitos. Este proceso se conoce como *CS-FallBack* en redes LTE.

Finalmente el núcleo IMS se encarga de establecer servicios multimedia a través de paquetes IP, permitiendo servicios tales como VoLTE y Video over LTE (ViLTE). Para poder efectuar este proceso, el núcleo IMS generará *bearers* comunes y dedicados para cada tipo de servicio que implemente, y gestionará a los usuarios mediante señalización Session Initiation Protocol (SIP).

2.2.1. Red de Acceso de Radio (RAN)

La red de acceso de radio, Radio Access Network (RAN), está compuesta por dos elementos: el equipo móvil del usuario UE, y la radio base Evolved NodeB (eNB).

2.2.1.1. User Equipment (UE)

El terminal móvil o User Equipment (UE), descrito en el documento TS 36.101 del 3GPP [8], es el dispositivo electrónico que le permitirá al usuario acceder a la red mediante una tarjeta identificadora Subscriber Identity Module (SIM) *Card*. En términos generales los terminales móviles están compuestos por una pantalla, un procesador (Central Processing Unit (CPU)) y una memoria interna. Cabe aclarar que otros dispositivos móviles, tales como un *tablet*, un *notebook* o un *wearable* pueden ser utilizados en conjunto con la SIM *Card* como terminal móvil.

2.2.1.2. Evolved NodeB (eNB)

El Evolved NodeB (eNB), descrito en el documento TS 36.101 del 3GPP [9], es el equivalente a una estación base, y como tal, es el ente encargado de establecer la comunicación con los terminales móviles. El eNB incorpora funciones antiguamente atribuidas a los controladores de radio base (Base Station Controller (BSC) en 2G y Radio Network Controller (RNC) en 3G), tales como la gestión del *handover*¹. Para ello, y a diferencia de la arquitectura 2G y 3G, en la arquitectura 4G se incorpora la interfaz X2 entre los eNB, permitiendo transferencia de datos entre ellos y señalización de control, evitando muchas veces la red troncal.

Las principales funcionalidades del eNB son: administrar dinámicamente los recursos de radio tales como los servicios portadores (*E-UTRAN Bearers*), el *scheduling*², funciones de control de acceso, y el control de movilidad, además de realizar encriptación de datos, administrar el *handover*, realizar compresión de la cabecera de paquetes IP, y mantener la conectividad con los elementos EPC, entre otros.

La comunicación entre el eNB y el UE se realiza mediante un enlace de radio, el cual se compone de un enlace descendente (*downlink*) y uno ascendente (*uplink*). Ambos enlaces están multiplexados por tecnologías derivadas de Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM): OFDMA para el *downlink*, y Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) para el *uplink*. A continuación se hace una breve descripción del funcionamiento de estos esquemas, y de cómo, a partir de estos esquemas, se crea la unidad mínima de información utilizada para el envío de datos a través del eNB.

¹**Handover:** También conocido como *handoff*, el *handover* es el proceso mediante el cual se transfiere el servicio de un terminal móvil de una estación base a otra, cuando la calidad del enlace es insuficiente.

²**Scheduling:** Proceso de planificación en la asignación de los recursos de radio para los usuarios. Este proceso se lleva a cabo por el *Scheduler*.

2.2.2. Interfaces E-UTRAN

Se presenta a continuación las interfaces existentes sobre el E-UTRAN. Estas son nombradas sin especificar en detalle los protocolos que estas utilizan, por escapar al alcance de la presente memoria.

- **Interfaz Radio (Uu):** La interfaz de radio es descrita en el documento TS 36.300 del 3GPP [10], y tratada de forma extensa en los documentos TS 36.2xx [11-15] y TS 36.3xx [16-25]. Esta interfaz, que se establece entre el eNB y el UE, soporta tres tipos de mecanismos de transferencia de información en el canal de radio. Estos son:
 - Difusión (*Broadcast*) de señalización de control en la zona de cobertura de la celda. La información difundida corresponde tanto a información específica de la red de acceso (denominada información del Access Stratum (AS)), como de la red troncal (denominada información Non-Access Stratum (NAS)). Esta información permite a los UEs detectar el eNB y conocer los parámetros básicos de la red.
 - Transferencia de paquetes IP a través del canal de radio. A la transferencia de paquetes IP entre el eNB y los equipos de usuarios se le conoce como servicios portadores de radio. Estos servicios portadores E-UTRAN han sido diseñados para transmitir únicamente tráfico IP y no soportan otro tipo de protocolos (tales como X.25 y tramas *Ethernet*).
 - Transferencia de control dedicada entre eNB y UE. Establece una conexión de control mediante protocolo Radio Resource Control (RRC), permitiendo realizar operaciones de establecimiento, modificación y liberación de los servicios portadores entre el eNB y el UE. Además permite el mecanismo de *handover*.
- **Interfaz eNB-EPC (S1):** La interfaz S1 es definida y descrita por el 3GPP en los documentos técnicos [26-30]. La interfaz se establece entre el eNB y el conjunto Mobility Management Entity (MME) - Serving Gateway (S-GW), y se sub-divide en dos planos: el plano de usuario, denominado S1-U (*S1 User Plane*), y el plano de control, denominado S1-C o S1-MME.
 - (a) **S1-U:** Proporciona un servicio de transferencia de datos entre el eNB y la entidad S-GW sin garantía de entrega de la información. De la misma forma, tampoco soporta mecanismos de control de errores ni de control de flujo.
 - (b) **S1-MME:** Soporta un conjunto de funciones y procedimientos de control entre eNBs y la entidad MME.

La interfaz S1 permite que un eNB esté conectado simultáneamente a múltiples entidades MMEs y/o múltiples S-GWs, generando una red más robusta contra fallos.

Dentro de los procedimientos que soporta la interfaz S1, destacan:

- Procedimiento para el establecimiento, modificación y liberación de recursos de los servicios portadores, tanto en la interfaz de radio como en la interfaz S1.
 - Procedimiento de *handover* entre eNBs. Si la red establece que se requiere un proceso de *handover* entre dos eNBs, y no existe una interfaz X2 entre ellos, la interfaz S1-MME es utilizada para gestionar el procedimiento.
 - Procedimiento de aviso o *paging*. El MME mantiene gestión de la localización de los UE, permitiendo conocer en cuál o cuales eNBs se encuentra un equipo en modo *idle*. De esta forma, cuando el MME desea que un terminal pase del modo *idle* a modo activo, ordena mediante la interfaz S1-MME la ejecución de avisos en los eNBs donde es probable que se encuentre el UE.
 - Procedimiento de envío de mensajes de señalización de control (con protocolos NAS) entre el eNB y el MME, que fluyen entre el MME y el UE [31].
- **Interfaz eNB-eNB (X2):** La interfaz X2 está definida y descrita por el 3GPP en los documentos técnicos [32-37]. Esta interfaz se establece entre dos eNB, y al igual que la interfaz S1, la interfaz X2 se sub-divide en un plano de usuario y un plano de control. En el plano de usuario la interfaz X2 provee transferencia de datos de usuarios entre eNB sin garantía de entrega de información y sin uso de mecanismos de control ni de flujo. Dicha transferencia de datos se realiza únicamente durante los procedimientos de *handover*. En el plano de control, la interfaz X2 realiza control de transferencia de paquetes IP al plano de usuario X2, además de realizar funciones de gestión de recursos de radio y coordinación de interferencias con eNBs cercanos.

2.2.3. Evolución del Core de Paquetes (EPC)

La red troncal o Evolved Packet Core (EPC) [38] está compuesta por cinco elementos: Mobility Management Entity (MME), Serving Gateway (S-GW), Public Data Network Gateway (P-GW), Home Subscriber Server (HSS) y el Policy and Charging Rules Function (PCRF). En la figura 2.5 se aprecia tanto los elementos de RAN como los de EPC.

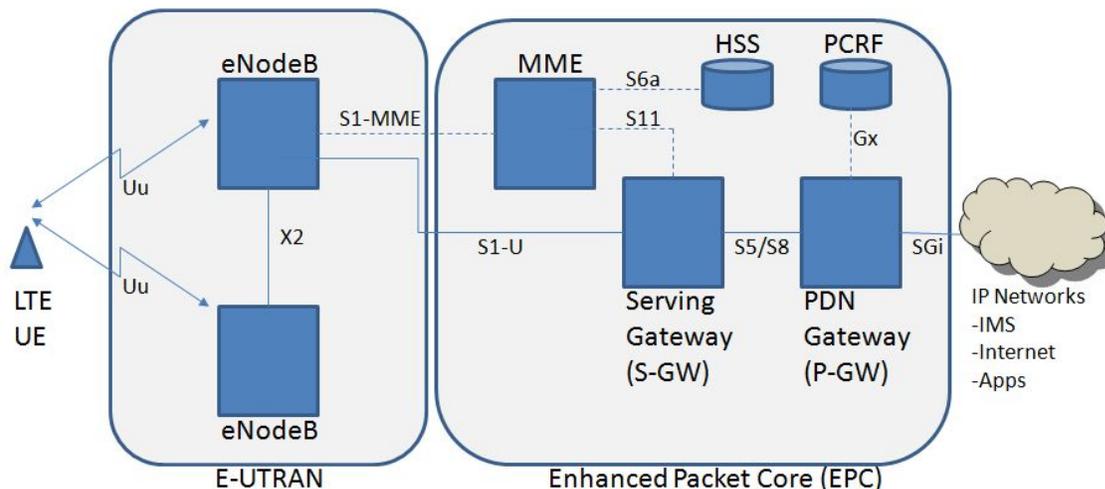


Figura 2.5: Red LTE: E-UTRAN y EPC

2.2.3.1. Mobility Management Entity (MME)

La entidad Mobility Management Entity (MME), definida en el documento TS 23.401 del 3GPP [38], es el elemento principal en el plano de control de la red LTE. Ésta se encarga de gestionar el acceso de los terminales a través de E-UTRAN, es decir, todo terminal que esté registrado en la red debe tener una entidad MME asignada hacia él. Cada MME sirve a un conjunto de radio bases eNBs.

Algunas de las funciones del MME son:

- Gestión de movilidad de los usuarios en modo *idle* (o *background*) dado que la entidad se encarga de realizar seguimiento de la ubicación de los usuarios.
- Autorización, control y autenticación de los usuarios en la red, a través de la información provista por la base de datos de los usuarios HSS.
- Gestión de los servicios portadores Evolved Packet System (EPS) en base a la señalización necesaria para establecer, mantener, modificar y eliminar los mismos.
- Soporte y gestión con procesos relacionados a las funciones de control derivados de las conexiones hacia y desde redes externas.

2.2.3.2. Serving Gateway (S-GW)

El Serving Gateway (S-GW), detallado en el documento TS 23.401 del 3GPP [38], es el elemento que permite brindar conexión entre el plano de usuario de E-UTRAN y la red troncal EPC. Un usuario registrado en la red LTE dispone de una entidad S-GW asociada. La asignación de la entidad S-GW se realiza respondiendo a criterios de balanceo de carga y geográficos.

Las principales funciones del S-GW son:

- Sirve como punto de referencia para la movilidad del terminal móvil entre eNB s durante el proceso de *handover*. Durante dicho proceso, se gatilla el cambio de servicio portador S1 (interfaz entre el eNB y el EPC) de los eNBs implicados y el S-GW correspondiente.
- Almacenamiento temporal de paquetes IP en el caso de que los terminales móviles se encuentren en modo *idle*.
- Encaminamiento del tráfico IP de subida de los usuarios hacia la entidad P-GW, y del tráfico de bajada desde la entidad P-GW hacia el eNB para ser entregado a los usuarios.

2.2.3.3. Packet Data Network Gateway (P-GW)

El Public Data Network Gateway (P-GW), detallado en el documento TS 23.401 del 3GPP [38], es el elemento de conectividad entre la red LTE y las redes externas. A través de esta entidad, un usuario conectado a LTE es visible mediante una dirección IP para las redes externas. Es a través del P-GW que los paquetes de datos IP transitan cuando un usuario establece comunicación con una red externa, ya sea enviando paquetes IP o recibiendo. Un usuario tendrá asignado como mínimo una entidad P-GW desde su registro en la red LTE.

Las principales funciones del P-GW son:

- Asignación de la dirección IP al terminal móvil. La dirección IP puede ser IPv4 o IPv6.
- Procesamiento del tráfico IP que pasa por la entidad, a través de un conjunto de filtros y *firewalls*. Esto permite inspeccionar y verificar la integridad de los paquetes IP, además de aplicar las reglas de tarificación entregadas por el PCRF .
- Medición de tráfico para la aplicación de la reglas de tarificación entregadas por el PCRF .

2.2.3.4. Home Subscriber Server (HSS)

El Home Subscriber Server (HSS), detallado en los documentos TS 23.002 y 23.008 del 3GPP [6, 39], es la base de datos que mantiene la información de los usuarios de la red. La información contenida en el HSS abarca tanto información de los suscriptores como de la operación de la red. El acceso a la base de datos se lleva a cabo a través del MME. La base de datos HSS también puede ser consultada por el subsistema de servicios multimedia IMS.

El HSS contiene información permanente, como por ejemplo las condiciones contractuales de los usuarios, tanto como información temporal, como por ejemplo la localización de un terminal. A su vez, tiene una amplia gama de permisos asociados, para evitar accesos y modificaciones que debiesen estar restringidos de forma exclusiva para un grupo administrador.

2.2.3.5. Policy and Charging Rules Function (PCRF)

El Policy and Charging Rules Function (PCRF), detallado en el documento TS 23.203 del 3GPP [40], es la entidad encargada de aplicar las reglas de tarificación sobre los servicios portadores que tenga establecido el terminal móvil y medidos por el PCRF . Puede mantener reglas avanzadas de tarificación, con el objetivo de discriminar por tipo de dato (voz, video, de una aplicación en particular, entre otros).

2.2.4. Interfaces EPC

Se presenta a continuación las interfaces existentes sobre el EPC. Estas son nombradas sin especificar en detalle los protocolos que estas utilizan, por escapar al alcance de la presente memoria.

- **Interfaz MME - MME (S10):** La interfaz S10, definida en el documento TS 29.274 del 3GPP [41], permite la comunicación entre entidades MME. Su principal función es la asignación de una nueva entidad MME en caso de ser requerida, debido a la movilidad del usuario. La información transmitida está relacionada a la gestión de los servicios portadores y a la gestión de movilidad, tales como el área de seguimiento, características del terminal, parámetros de suscripción con el HSS, claves de cifrado, entre otros.
- **Interfaz MME - S-GW (S11):** La Interfaz S11, contenida en el documento TS 29.274 del 3GPP [41], permite establecer el nexo entre el plano de control, con las funciones del plano de usuario de la red troncal EPC, permitiendo controlar el plano de usuario desde la entidad MME. Los procedimientos soportados en esta interfaz permiten la creación, modificación y eliminación de los servicios portadores que los terminales tienen establecidos a través de la red troncal. La interfaz S11 soporta además el proceso de reubicación de la pasarela S-GW asociada a un terminal.
- **Interfaces P-GW - S-GW (S5/S8):** Las interfaces S5 y S8, detalladas en los documentos TS 29.274, 29.281 y 29.275 del 3GPP [41-43], permiten la transferencia de paquetes de usuario entre las entidades P-GW y S-GW. La interfaz S5 se utiliza cuando ambas entidades pertenecen a la misma red, en cuanto que la interfaz S8 se utiliza en escenarios de *roaming* donde el S-GW pertenece a la red visitada y el P-GW a la red matriz. Sólo la interfaz S5 será utilizada durante una llamada VoLTE.
- **Interfaz HSS - MME (S6a):** La interfaz S6a, detallada en el documento TS 29.272 del 3GPP [44], permite la transferencia de información entre la base de datos HSS y la entidad de control MME. Esta además soporta escenarios de *roaming* (una entidad MME de la red de un operador puede acceder a la base de datos HSS de otro operador). Dentro de las principales funciones que soporta la interfaz S6a se encuentra la actualización, desde el nodo MME, de la información de la base de datos HSS, y la transferencia del vector de autenticación del usuario al nodo MME correspondiente, para que este autorice o rechace la conexión del usuario a la red.
- **Interfaz P-GW - Redes Externas (SGi):** La interfaz SGi, detallada en el documento TS 29.061 del 3GPP [45], es utilizada para la interconexión de la entidad P-GW con redes externas IP. Dichas redes externas pueden ser redes públicas como la *Internet*, como redes privadas. Esta interfaz soporta la interconexión tanto a redes IPv4 como IPv6.
- **Interfaz PCRF - P-GW (Gx):** La interfaz Gx, detallada en el documento TS 29.212 del 3GPP [46], conecta el PCRF con el P-GW, permitiendo al PCRF control directo sobre funciones y políticas de cobro aplicables sobre el P-GW.

2.2.5. Subsistema Multimedia (IMS)

El subsistema IP Multimedia Subsystem (IMS), detallado en el documento TS 23.228 del 3GPP [47], es una arquitectura integrada al núcleo de la red LTE, y en algunos casos es tratada como un *core* independiente, encargado de proporcionar los mecanismos de control necesarios para la provisión de servicios multimedia basados en IP a los usuarios de la red. Fue creado para proveer un nivel de QoS en las sesiones multimedia de tiempo real y de esta forma establecer esquemas de tarificación apropiados, además de realizar la integración de diferentes servicios desarrollados por terceros, entregando un nuevo servicio final al usuario. IMS tiene sus orígenes en el *release* 5 del sistema UMTS, pero su evolución ha ocasionado que su campo de aplicación se expanda a otras tecnologías.

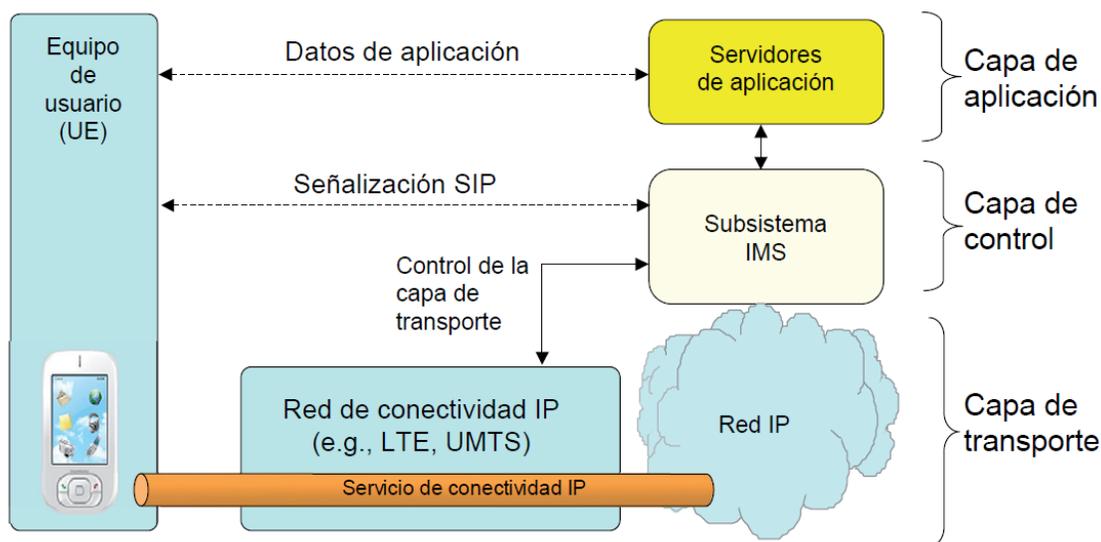


Figura 2.6: Modelo de provisión de servicios en base al subsistema IMS

IMS es un elemento clave en la arquitectura LTE, pues permite el acceso a *Internet* mediante la red celular, gestiona la provisión de servicios de voz y video IP, mensajería instantánea, entre otros. El acceso de los terminales a IMS se hace a través de los servicios de conectividad IP que brinda la red LTE (P-GW).

Dentro de los protocolos posibles en IMS, el 3GPP escogió SIP como base para la señalización asociada al subsistema IMS. SIP es un protocolo para establecer, administrar y liberar sesiones multimedia sobre redes IP, el cual sigue el modelo cliente-servidor, heredando la mayoría de los protocolos de redes IP, tales como Simple Mail Transfer Protocol (SMTP) y Hypertext Transfer Protocol (HTTP).

El núcleo del subsistema IMS está conformado por las entidades Call Session Control Function (CSCF). Estas son responsables de establecer, monitorear, apoyar y liberar sesiones multimedia. Se componen de tres entidades separadas:

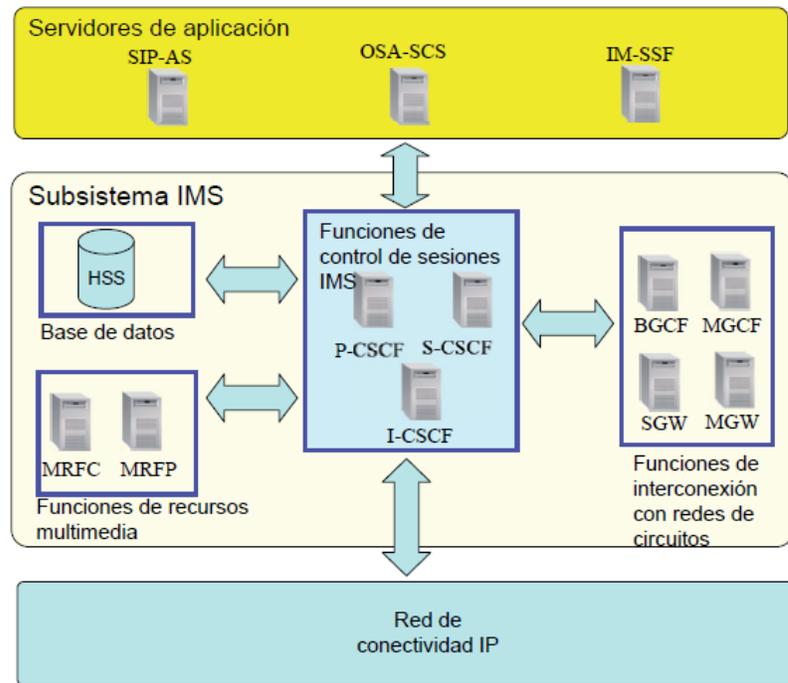


Figura 2.7: Arquitectura simplificada del subsistema IMS

- Proxy CSCF (P-CSCF): servidor SIP que sirve de entrada al subsistema IMS desde una red IP. Toda la señalización SIP desde la red LTE transcurre a través de este servidor. Entre sus funcionalidades, el nodo se encarga de aplicar las reglas tarifarias (a través del PCRF).
- Serving CSCF (S-CSCF): actúa de nodo central de la señalización IMS, realizando el registro SIP de los usuarios. Con ello, cada mensaje de señalización SIP debe pasar por este nodo. El nodo proporciona algunos servicios como el de re-direccionamiento de llamadas, listas de marcado, registro de ubicación, entre otros.
- Interrogating CSCF (I-CSCF): servidor SIP que sirve de entrada de la señalización SIP proveniente de redes externas. El I-CSCF es la entidad que inicia la asignación de un usuario a un S-CSCF durante el registro.

Los servidores IMS tienen acceso a la base de datos HSS, pues es requerida la información relacionada al soporte de sesiones multimedia almacenada en ella.

En el contexto específico de VoLTE, la GSM Association (GSMA) define dos perfiles para el IMS: el GSMA IR.92 [48] es un perfil que identifica un conjunto mínimo obligatorio de características especificadas en el 3GPP, que un dispositivo inalámbrico (UE) y una red deben implementar para garantizar un servicio de telefonía de voz interoperable y de alta calidad mediante el *core* IMS, a través de LTE. En tanto que el GSMA IR.94 [49] es un perfil que, de forma análoga al IR.92, define un conjunto mínimo obligatorio de características especificadas en el 3GPP, que un dispositivo inalámbrico y una red están obligados a implementar para garantizar un servicio de video conversacional interoperable y de alta calidad, basado en IMS.

2.2.5.1. Señalización SIP

Session Initiation Protocol (SIP) fue desarrollado por el Internet Engineering Task Force (IETF) para el control de paquetes multimedia en tiempo real, basándose en el protocolo de transferencia de hipertexto HTTP. El RFC 3261 [50] define el protocolo SIP básico, pero hay extensiones en varias otras especificaciones IETF, en particular RFC 3455 [51], que define las extensiones SIP para su uso en el subsistema multimedia IP. Además de las especificaciones antes mencionadas, el 3GPP incorpora en el documento TS 24.229 [52], que define el uso de SIP dentro del *core* IMS.

SIP está basado en texto en lugar de código binario, lo que hace que los mensajes de señalización sean largos, pero de fácil lectura. Al igual que HTTP, SIP es un protocolo cliente-servidor: un cliente envía una solicitud a un servidor, y este le responde con lo solicitado. Sin embargo, a diferencia de HTTP, un dispositivo SIP puede funcionar como cliente y como servidor. De forma predeterminada, los mensajes SIP se transportan utilizando User Datagram Protocol (UDP) en lugar de Transmission Control Protocol (TCP), lo que implica que no exista garantía de que los mensajes sean entregados de forma fiable, por lo que SIP incluye sus propios mecanismos de confirmación y retransmisión.

SIP REQUEST	SHORT DESCRIPTION
ACK	Confirm that an entity has received a final response to an INVITE request
BYE	This method signals termination of a dialog and ends a call
CANCEL	Cancel any pending request
INFO	Send mid-session information that does not modify the session state
INVITE	Initiates a SIP dialog with the intent to establish a call
MESSAGE	Transport text messages
NOTIFY	Inform a subscriber of notifications of a new event
OPTIONS	Query the capabilities of an endpoint
PRACK	Provisional acknowledgement
PUBLISH	Publish an event to a notification server
REFER	Ask recipient to issue SIP request for the purpose of call transfer
REGISTER	Register the SIP URI
SUBSCRIBE	Initiates a subscription for notification of events from a notifier
UPDATE	Modifies the state of a session without changing the state of the dialog

Tabla 2.2: Tipos de requerimientos (*Requests*) SIP

Durante una comunicación mediante señalización SIP, una petición de un cliente (*request*) es una simple expresión de texto. Existen diversas solicitudes SIP, sin embargo tres de ellas son vitales para comprender una llamada VoLTE: *Register* establece comunicaciones de señalización entre el móvil UE y el *core* IMS, *Invite* establece una llamada, y *Bye* finaliza la llamada. La respuesta del servidor contiene un código numérico de tres dígitos y una breve descripción de texto. El primer dígito del código de respuesta puede tener seis valores: 1 indica una respuesta provisional; 2 indica una respuesta satisfactoria; 3 pide al cliente que tome nuevas medidas, y 4 al 6 indican varios tipos de error.

SIP Code	Type of Response
1xx	Provisional Responses
2xx	Successful Responses
3xx	Redirection Responses
4xx	Client Failure Responses
5xx	Server Failure Responses
6xx	Global Failure Responses

Tabla 2.3: Tipos de códigos de respuesta SIP

2.2.5.2. Servicios de Comunicación Enriquecidos (RCS)

Los servicios Rich Communications Services (RCS) son una iniciativa basada en tecnología IMS, apoyada por muchos operadores y proveedores, la cual proporciona un conjunto de características. RCS utiliza las normas y especificaciones existentes del 3GPP, Open Mobile Alliance (OMA) y del GSMA, permitiendo la interoperatividad de las funciones compatibles entre los operadores que soportan la *suite*. RCS soporta voz de conmutación de circuitos (CS) y de conmutación de paquetes (PS). Los servicios RCS son parte importante de las llamadas VoLTE, pues son uno de los principales factores de distinción con otras aplicaciones de llamadas VoIP, permitiendo generar nuevos servicios.

Las principales características de los servicios RCS incluyen:

- Intercambio de capacidad del usuario o descubrimiento de servicio con el que los usuarios pueden conocer las capacidades de otros usuarios.
- Mensajería mejorada: basada en IP, con texto de apoyo, mensajería instantánea, multimedia, historial de chat y mensajería.
- Llamadas enriquecidas, que incluyen contenido multimedia (como compartir fotos o vídeos) durante las llamadas de voz. Esto podría convertirse en la principal forma en que los operadores ofrecen video-llamadas.

Los principales factores para la adopción de RCS son la capacidad de desplegar VoLTE de una manera bien definida y de soportar la mensajería en el dominio IP. RCS se ocupa de la tendencia del mercado de los usuarios que se alejan de la mensajería tradicional basada en texto y proporciona una plataforma para servicios basados en operadores que compiten con las aplicaciones de mensajería Over The Top (OTT).

2.3. Capa Física

2.3.1. Radio Enlace

A continuación se presentan los principales esquemas de multiplexación y elementos que componen el radio enlace LTE:

OFDM

OFDM es un esquema de multiplexación multiportadora que utiliza un gran número de subportadoras para poder transmitir información de datos y control sobre un cierto ancho de banda. El esquema se vale de propiedades de ortogonalidad de sus subportadoras para poder efectuar la transmisión simultánea de símbolos, logrando la separación de los mismos en la recepción. Cada subportadora es modulada individualmente mediante esquemas convencionales tales como Phase Shift Keying (PSK) y Quadrature Amplitude Modulation (QAM).

OFDM posibilita la multiplexación de un conjunto de subportadoras sin la utilización de filtros, generando un gran aprovechamiento en el uso del espectro, por lo cual es ampliamente utilizado en aplicaciones de televisión digital, redes inalámbricas de área local, y redes cableadas de acceso a Internet de banda ancha.

OFDMA

OFDMA se utiliza en el *downlink*, y permite asignar dinámicamente en función de la calidad de transmisión del canal de radio cantidades distintas de subportadoras a los usuarios. Dentro de las ventajas de OFDMA, se pueden destacar: permite manejar diferentes velocidades de transmisión a los usuarios en función de los requerimientos de servicios de cada uno, la asignación de subportadoras a los usuarios se lleva a cabo de forma dinámica dependiendo de las condiciones de ruido del canal, es robusta ante la interferencia intersímbolo resultante de la propagación multicamino. En contraste, OFDMA presenta la desventaja de requerir potencias instantáneas transmitidas significativamente mayores a la potencia media, requiriendo sofisticados amplificadores de potencia.

SC-FDMA

SC-FDMA es utilizado en el enlace ascendente (*uplink*), y se diferencia de los anteriores porque los símbolos en el dominio del tiempo son convertidos al dominio de la frecuencia utilizando la Transformada Discreta de Fourier (Discrete Fourier Transform (DFT)), y luego convertidos nuevamente al dominio del tiempo utilizando la transformada inversa (Inverse Fast Fourier Transformation (IFFT)). La principal ventaja de esta modulación es que reduce el Peak to Average Power Ratio (PAPR), logrando un uso muy eficiente de la energía de las baterías de los dispositivos móviles.

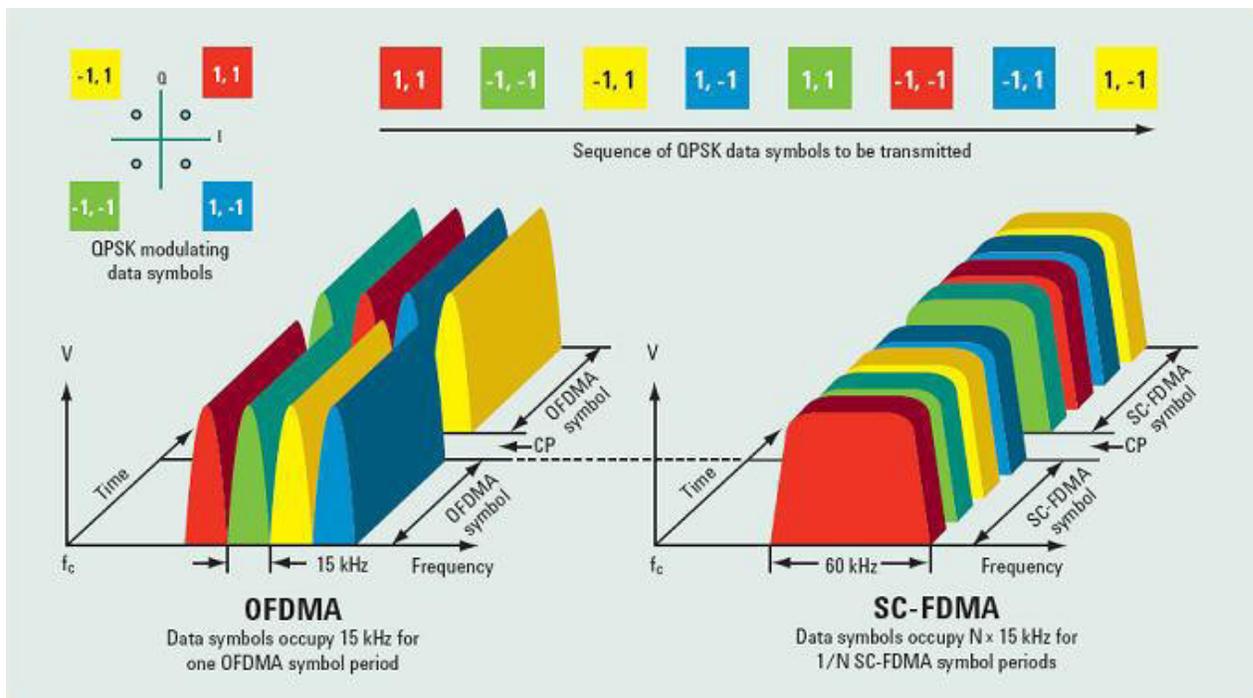


Figura 2.8: OFDMA y SC-FDMA

2.3.2. Frame LTE y Physical Resource Block (PRB)

Para transmitir la información entre la radio base (eNB) y el usuario (UE) las redes móviles LTE utilizan estructuras de datos llamados *frames* y *sub-frames*. Estas estructuras de datos permiten gestionar los distintos tipos de información que deben ser transportados y a mantener la sincronización en el radio-enlace E-UTRA, es decir, en la interfaz aérea entre el eNB y el UE. Las estructuras de datos LTE se describen en el documento 3GPP TS 36.211 [12].

Las redes móviles LTE trabajan con una de dos estructuras de datos posibles: LTE *Frame* FDD o *frame* tipo 1, para duplexación en frecuencia, y LTE *Frame* TDD o *frame* tipo 2, para duplexación en tiempo.

- LTE Frame FDD: El *frame* FDD tiene una longitud total de 10 ms. Este se divide en 10 *sub-frames* de 1 ms cada uno, y cada uno de éstos está compuesto por dos *slots* de 0.5 ms cada uno. Cada *slot* tendrá 6 o 7 símbolos OFDM dependiendo del largo del Cyclic Prefix (CP).
- LTE Frame TDD: El *frame* TDD, al igual que en FDD, posee una longitud total de 10 ms, pero se diferencia al anterior en que éste se divide en dos partes de 5 ms cada uno llamados *half-frames*. Los *half-frames* son divididos en 5 *subframes* cada uno, y a diferencia de FDD, estos se dividen entre *downlink* y *uplink*, además los *subframes* 1 y 6 llevarán datos especiales de sincronización y periodos de guarda.

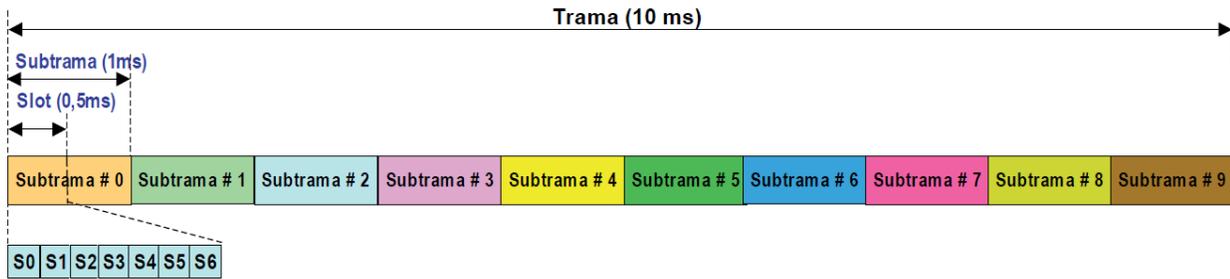


Figura 2.9: Composición de un Frame LTE FDD

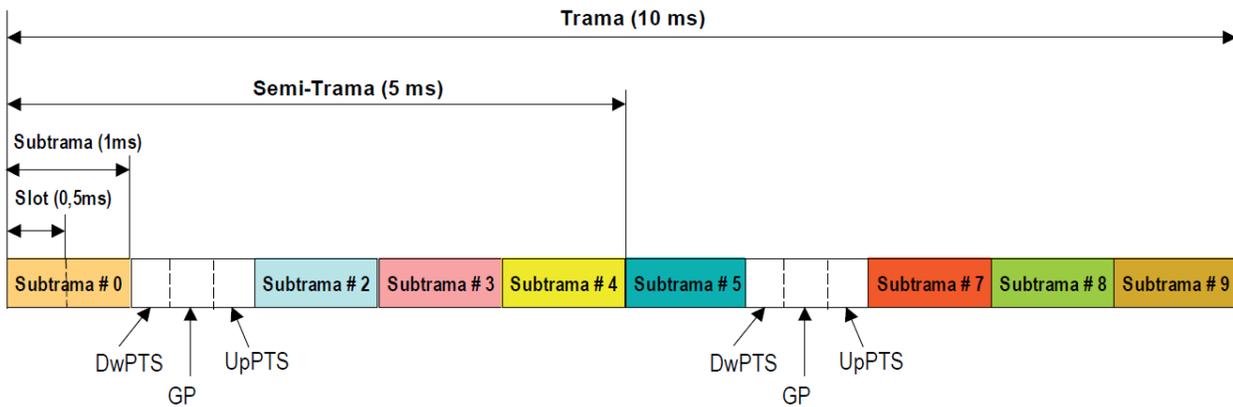


Figura 2.10: Composición de un Frame LTE TDD

A partir de éste punto se tratará exclusivamente *frames* FDD, dadas las características de red que Entel opera.

Como antes se mencionó, en un *frame* FDD cada *sub-frame* tiene una duración de 1 ms. Este periodo corresponde a la unidad mínima de tiempo que se le puede asignar a un usuario, y se conoce como Transmission Time Interval (TTI). Cada *sub-frame* posee dos *slots* de 0.5 ms cada uno, y en cada uno de estos *slots* se aloja un Physical Resource Block (PRB) el cual transporta la información.

El PRB es el elemento mínimo de información que puede ser asignado por el eNB a un terminal móvil. El ancho de banda de un PRB es de 180 KHz y está compuesto por 12 sub-portadoras de 15 KHz cada una, en el que se transmiten 6 o 7 símbolos OFDMA. La duración de un PRB es igual a 0.5 ms. En general se hace abuso de lenguaje y se entiende como PRB al conjunto de dos bloques contiguos (un *sub-frame* completo), es decir, dos *physical resource blocks* por definición o 168 *resource elements*. En la figura 2.11 se puede visualizar la composición de un PRB.

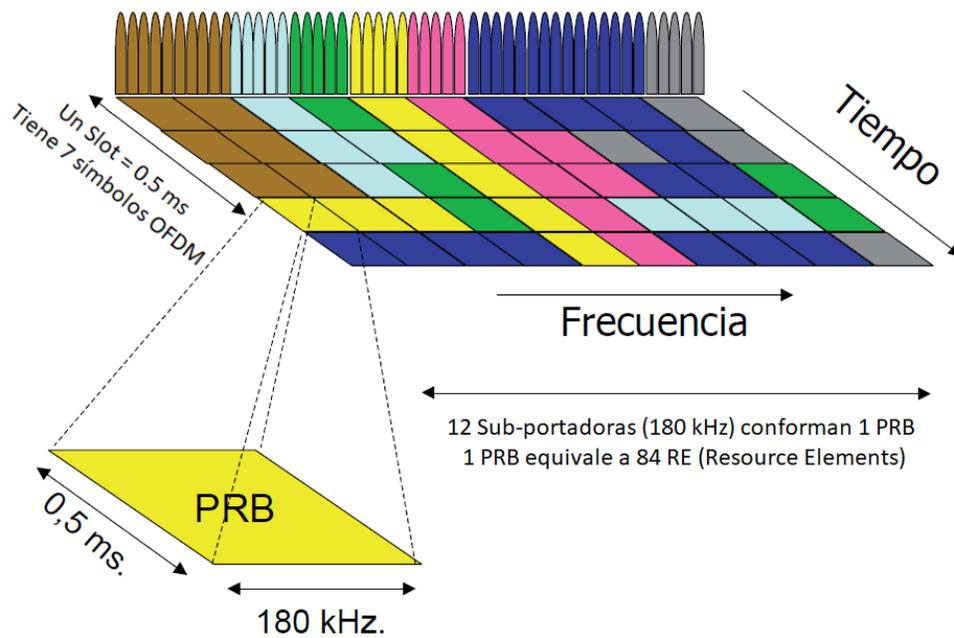


Figura 2.11: Composición de un PRB

Los PRBs son el principal recurso de radio en redes 4G, siendo éste un recurso escaso y limitado por el ancho de banda. La asignación de estos recursos en un *frame* VoLTE se realiza dinámicamente mediante el *scheduler*, el cual asigna una cierta cantidad de PRBs para cada usuario a lo largo de un *frame* VoLTE en cada unidad de tiempo TTI. En una red LTE, la cantidad de PRB que se disponga dependerá del ancho de banda. En la tabla 2.4 se puede distinguir que para un ancho de banda de 20 MHz se tiene 100 PRBs disponibles, mientras que para un ancho de banda de 15 MHz se dispondrá de 75 PRBs .

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Número de PRBs	6	15	25	50	75	100
Número de Subportadoras	73	181	301	601	901	1201

Tabla 2.4: Número de PRBs y subportadoras dado el Ancho de Banda en LTE

2.3.3. Canales

En las redes LTE los canales son estructuras de datos que transportan la información. Existen tres tipos de canales: Canales Lógicos, Canales de Transporte y Canales Físicos.

- **Canales Lógicos:** Los canales lógicos se ubican entre la capa Media Access Control (MAC) y Radio Link Control (RLC) y definen el tipo o naturaleza de la información que se transmite (de control o de usuario).
- **Canales de Transporte:** Los canales de transporte se encuentran entre la capa física y la capa MAC y definen el formato de envío (canales comunes o compartidos), determinando cómo se estructura la información en los bloques de transporte (*Transport Blocks*).
- **Canales Físicos:** Se ubican en las capas más bajas y por ende están relacionados con la transmisión y recepción de las señales físicas a través de la interfaz de aire. Los canales físicos establecen cómo se transmiten los bits de transporte en las subportadoras OFDM.

Para la presente memoria es de especial interés los canales físicos, pues es en base a estos canales que se determina el *link budget*. Los canales físicos se tratan en los documentos 3GPP TS 36.211, 36.212 y 36.300 [10, 12, 13]. No se detallará los otros tipos de canales por escapar al alcance de la memoria.

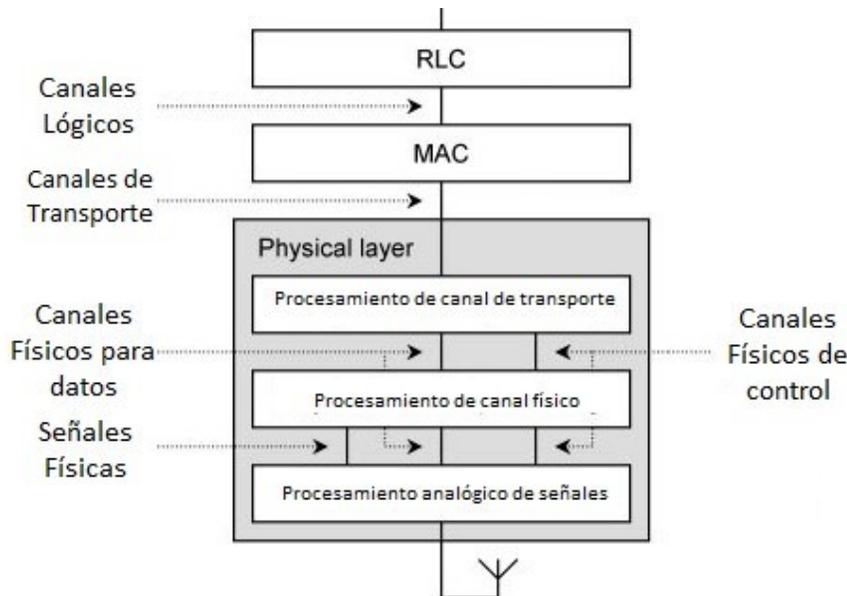


Figura 2.12: Canales

2.3.3.1. Canales Físicos - Downlink

En el enlace descendente, existen dos canales físicos para el transporte de datos, y cuatro canales de control. Estos canales son:

- **PDSCH:** El Physical Downlink Shared Channel (PDSCH) es el canal principal de datos del enlace de bajada, contando con la mayoría de los recursos (REs). Su principal función es enviar la información al usuario (UE). También es utilizado para enviar mensajes de *paging* y mensajes de señalización para usuarios con recursos dedicados. Su denominación de *Shared* proviene de que este canal es compartido por múltiples usuarios y por varios canales lógicos. Puede utilizar modulación Quadrature Phase-Shift Keying (QPSK), 16-QAM o 64-QAM.
- **PMCH:** EL Physical Multicast Channel (PMCH) es el canal que realiza *multi-casting* de paquetes a un grupo de UEs, en lugar de un único UE. Transporta los paquetes de *broadcast* y *multicast*. La estructura del canal es similar a la del PDSCH.
- **PDCCH:** El Physical Downlink Control Channel (PDCCH) es el canal principal de control en el enlace de bajada, transmitiendo la información de planificación (*scheduling*) para el enlace de bajada e instrucciones para el enlace de subida (tanto para recursos como instrucciones de control de potencia). Utiliza modulación QPSK.
- **PBCH:** El Physical Broadcast Channel (PBCH) es el canal de control por difusión (*broadcast*), transmitiendo los parámetros esenciales del sistema, como el ancho de banda, información del canal PHICH, número de antenas del eNB, tipo de *frame* utilizado, entre otros. Utiliza modulación QPSK.
- **PCFICH:** El Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH) es el canal de control que transmite el número de símbolos de control presentes en la sub-trama actual, determinando el tamaño de control a utilizar. En LTE puede haber un máximo de tres símbolos de control. Utiliza modulación QPSK.
- **PHICH:** El Physical HARQ Indicator Channel (PHICH) es el canal de control utilizado para reconocer la recepción de paquetes del enlace ascendente al UE. El PHICH lleva la información ACK y NACK al UE para indicar si el eNB ha decodificado correctamente el paquete del enlace ascendente.

Además de los canales físicos de bajada, existen señales de referencia de bajada que no son canales. Estas señales de referencia sirven para realizar mediciones del canal y ayudar con los procesos de sincronización temporal.

- **RS:** Las señales Reference Signal (RS) se utilizan para obtener medidas de calidad en el enlace descendente, estimar la respuesta de impulso del canal para una correcta demodulación e implementar mecanismos de búsqueda de celda.
- **SS:** Las señales Synchronization Signal (SS) se descomponen en Primary SS (P-SS) y Secondary SS (S-SS). La primera permite la sincronización temporal de las sub-tramas (*sub-frames*) mediante un proceso de correlación entre la señal recibida y una secuencia de referencia en el receptor. La segunda posibilita la sincronización temporal de la trama (*frame*) utilizando la misma metodología que la anterior.

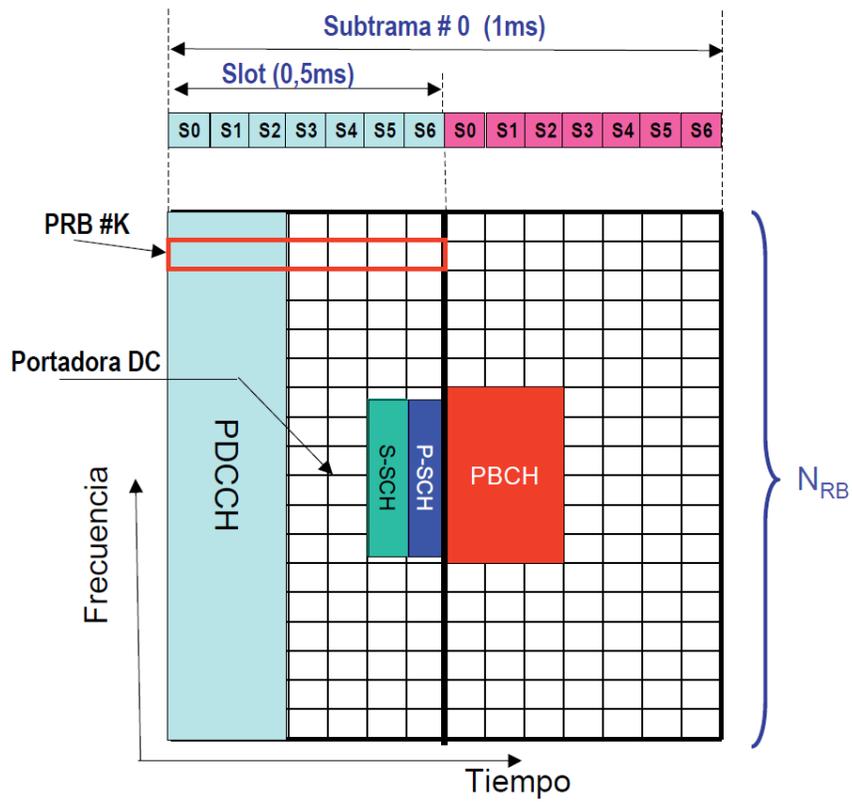


Figura 2.13: Canales Físicos en un RB - Downlink

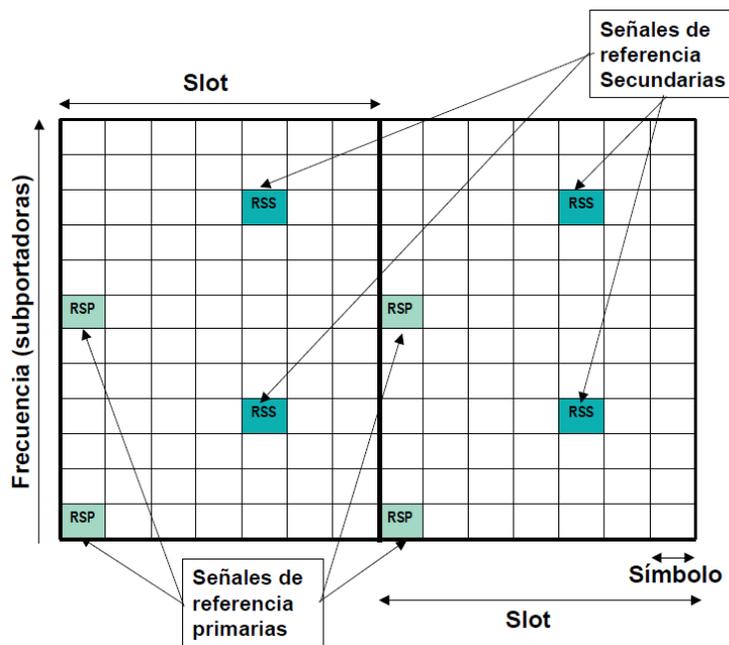


Figura 2.14: Señales de Referencia (RS) en un RB

2.3.3.2. Canales Físicos - Uplink

En el enlace ascendente existe un canal de transporte, un canal de control y un canal de acceso. Estos son:

- **PUSCH:** El Physical Uplink Shared Channel (PUSCH) es el canal de transporte en el enlace ascendente. Además de transmitir la información enviada por el usuario, lleva información de control. Puede utilizar modulación QPSK, 16-QAM o 64-QAM.
- **PUCCH:** El Physical Uplink Control Channel (PUCCH) es el canal de control en el enlace ascendente. Lleva información de paquetes ackACK y NACK, indicador Channel Quality Indicator (CQI), y requerimientos de *scheduling*. Utiliza modulación Binary Phase-Shift Keying (BPSK) o QPSK.
- **PRACH:** El Physical Random Access Channel (PRACH) es el canal de acceso aleatorio. Se utiliza para enviar los mensajes de acceso aleatorio que posibilitan la conexión entre el UE y la red.

Para el estudio de la presente memoria, el canal PUSCH será el principal foco para el cálculo del *link budget* en el enlace de subida.

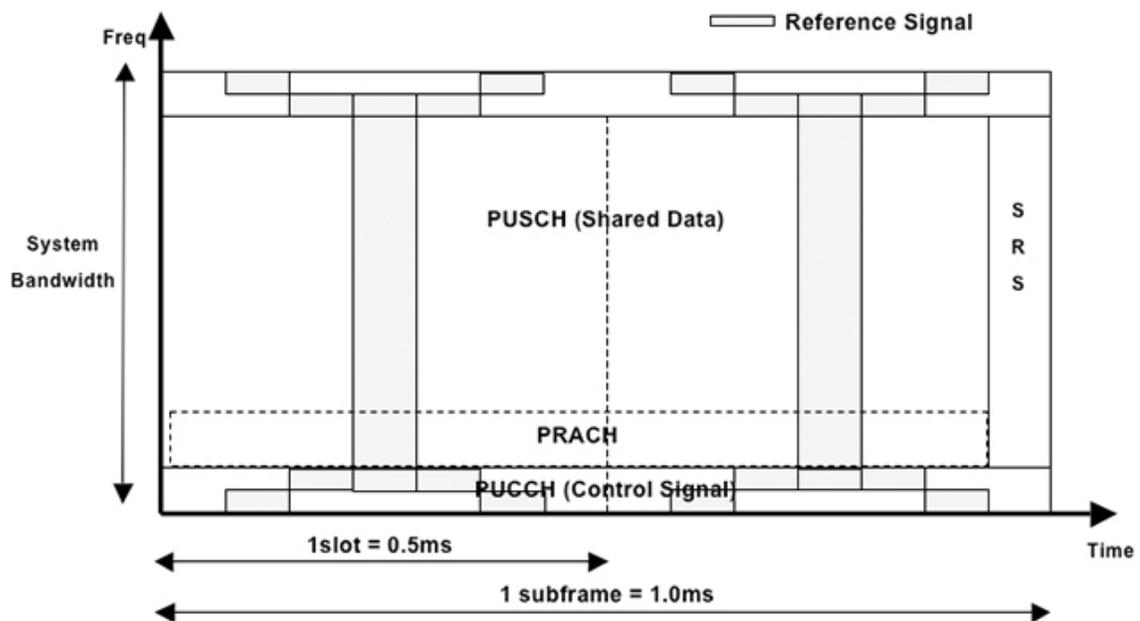


Figura 2.15: Canales Físicos en un RB - Uplink

2.3.4. Arreglo de Múltiples Antenas - MIMO

Todas las tecnologías inalámbricas se enfrentan a los desafíos del desvanecimiento de la señal, la creciente interferencia y el espectro limitado. La tecnología Multiple Inputs Multiple Outputs (MIMO) aprovecha el *multipath*³ para proporcionar un mayor rendimiento de datos y un aumento simultáneo en rango y confiabilidad, sin utilizar ancho de banda adicional. Esto ayuda a resolver los problemas comunes de las tecnologías inalámbricas: mayor velocidad (*throughput*) y alcance.

MIMO es un enfoque multidimensional que transmite y recibe dos o más flujos de datos únicos a través de un solo canal de radio, con lo que el sistema entrega dos o más veces la velocidad de datos por canal. Con MIMO, la velocidad de datos máxima por canal crece linealmente con el número de diferentes flujos de datos que se transmiten en el mismo canal.

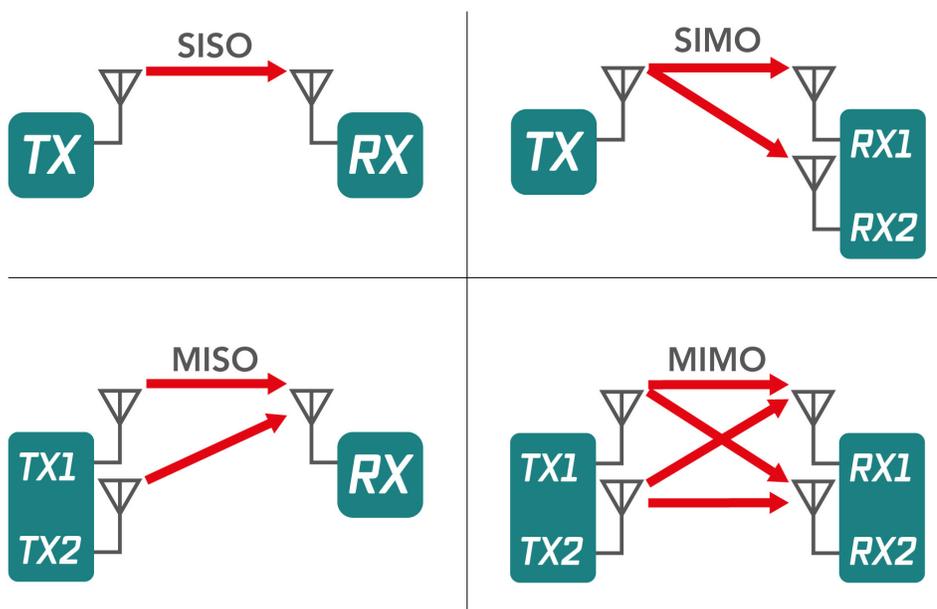


Figura 2.16: Configuraciones de Antenas: SISO, SIMO, MISO, MIMO

Existe variedad de formatos en que se puede realizar diversidad espacial con múltiples antenas. Dependiendo de la formato establecido, se tendrá uno de los siguientes cuatro modos:

- **SISO:** Single Input Single Output (SISO) es el formato más simple, contemplando una sola antena de transmisión y una antena de recepción. Esta configuración de antenas no posee ganancia por diversidad, y se ve muy afectada por el desvanecimiento de la señal y la interferencia. La velocidad de transmisión estará limitada superiormente por el teorema del canal Shannon.

³**Multipath:** En telecomunicaciones, este término se utiliza para hacer referencia a la propagación multicamino que se produce en señales de radio.

- **MISO:** Multiple Inputs Single Output (MISO) se obtiene cuando existen múltiples (dos o más) antenas de transmisión y una sola antena de recepción. Esta configuración también es conocida como diversidad de transmisión. En configuraciones MISO, tanto la mayor cantidad de antenas como el mayor procesamiento están del lado del transmisor, ayudando a reducir la energía consumida por parte del receptor.
- **SIMO:** Single Input Multiple Outputs (SIMO) ocurre cuando existe una sola antena transmisora y múltiples (dos o más) antenas receptoras. Esta configuración también es conocida como diversidad en el receptor. Esta configuración se utiliza a menudo cuando se quiere habilitar un sistema receptor que recibe señales de un número de fuentes independientes, para combatir los efectos del desvanecimiento y la interferencia. Existe dos formatos de SIMO posibles: SIMO de Diversidad Conmutada, donde se busca la señal más fuerte y se cambia a esa antena, y SIMO de Máxima Relación Combinada, donde se suman ambas señales.
- **MIMO:** Multiple Inputs Multiple Outputs (MIMO) ocurre cuando existen varias (dos o más) antenas transmisoras y varias (dos o más) antenas receptoras. MIMO proporciona tanto solidez de canal como mejor rendimiento de este. Para poder utilizar MIMO, es necesario utilizar codificación de los canales, con el fin de separar los datos de las diferentes rutas.

2.4. Gestión de Sesiones

2.4.1. Servicios Portadores (Bearers)

Bearer o servicio portador, es un concepto virtual, el cual es utilizado para describir cómo la información es tratada para viajar a través de un medio. En términos simplificados, un *bearer* es un camino o una tubería virtual por la cual se transmiten datos de un tipo determinado. Un *bearer* está conformado por una o varias interfaces.

Dependiendo del *bearer* por el cual sean transportados los datos, la red puede manejarlos de forma distinta, permitiendo garantizar una tasa mínima de bits, latencia máxima, o un ratio máximo de paquetes perdidos. Estas garantías son especialmente utilizadas para aplicaciones que intrínsecamente requieren garantizar una tasa de bits o una latencia máxima, como lo son las aplicaciones *multimedia*, tales como VoLTE y ViLTE.

Durante el establecimiento de una conexión entre el usuario y la red, existen diferentes servicios de *bearers* involucrados que garantizan la conexión. Estos tendrán un QoS Class Identifier (QCI) asociado, y serán establecidos entre distintas entidades de la red LTE, como se aprecia en la figura 2.17.

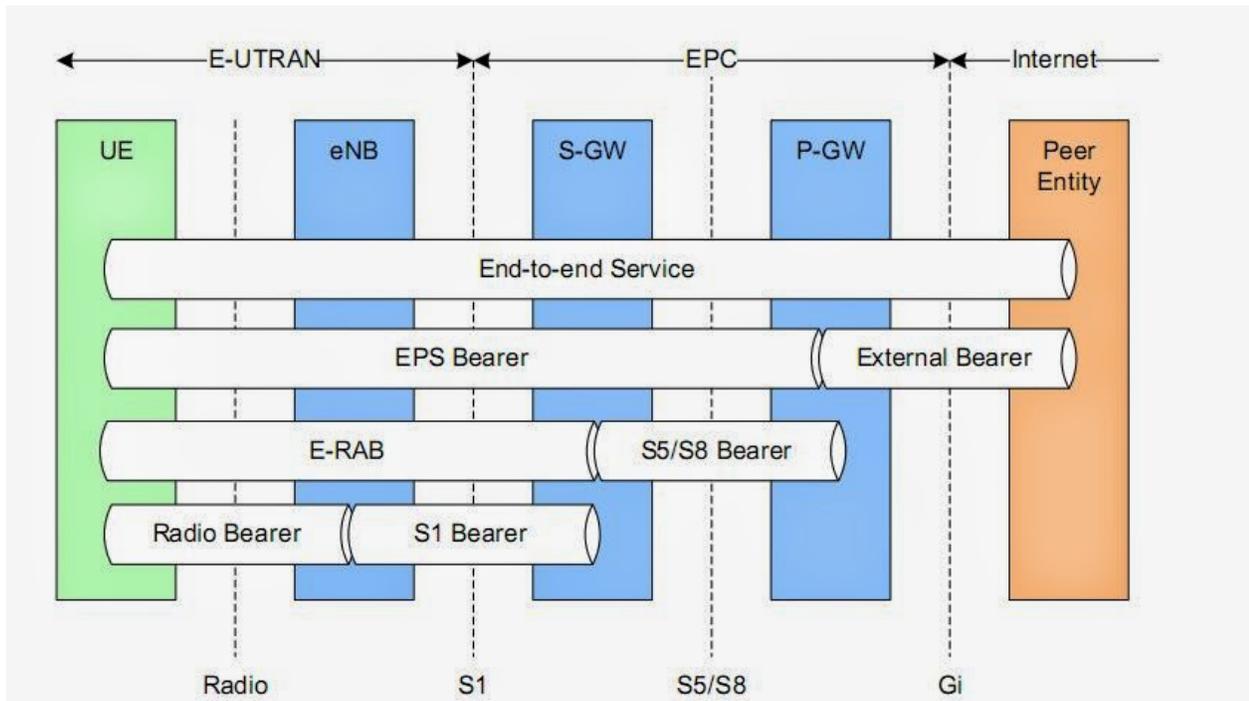


Figura 2.17: *Bearers* en una red LTE

Los 5 tipos de *bearers* presentes en una red LTE son:

- **Radio Bearer:** Encargado del traslado de los datos por medio de la interfaz de aire Uu. Incluye dos tipos de *bearers*: Data Radio Bearer (DRB) para los datos del usuarios, y Signalling Radio Bearer (SRB) para datos de control. El acceso de radio RAN puede soportar hasta ocho *bearers* tipo DRB, y dos *bearers* tipo SRB por cada equipo móvil UE.
- **EPS Bearer:** Encargado del traslado de la información transmitida por el usuario (UE) hacia el P-GW. Cada enlace EPS *Bearer* tiene asignado un portador DRB, un portador S1, y un portador S5 u S8.
- **Evolved Radio Access Bearer (E-RAB):** Es la unión de un servicio portador de radio y un *bearer* S1. Transmite los datos del usuario entre el UE y el S-GW. Existe un mapeo uno a uno entre un *bearer* E-RAB y un *bearer* DRB.
- **S1 Bearer:** Transporta los datos entre el eNB y el S-GW.
- **S5/S8:** Transporta los datos entre el S-GW y el P-GW.

Como ya se mencionó, cada *bearer* tendrá un QCI asociado, permitiendo garantizar la calidad de servicio. A continuación se detallan los distintos niveles de QCI existentes para las redes 4G.

2.4.2. Identificaor de Clase de QoS (QCI)

El QoS Class Identifier (QCI), especificado en el documento TS 23.203 del 3GPP [40], es un identificador de clase que se usa para garantizar una cierta calidad de servicio QoS. Una red LTE requiere diferentes niveles de QoS para distintas aplicaciones, otorgando un valor de QCI para cada servicio portador diferente.

Un nivel o clase de QCI agrupa varios valores para los parámetros de QoS, los que incluyen la tasa de bits garantizada (GBR) y tasa de bits no garantizada non-Guaranteed Bit Rate (nGBR), prioridad de manejo, máximo retardo aceptado, y tasa de pérdida de paquetes.

<i>QCI</i>	<i>Resource Type</i>	<i>Priority</i>	<i>Delay</i>	<i>Packet loss rate</i>	<i>Examples of services</i>
1	GBR	2	100 ms	10^{-2}	Voice
2		4	150 ms	10^{-3}	Video Calling
3		3	50 ms	10^{-3}	Games
4		5	300 ms	10^{-6}	Video.
5	Non-GBR	1	100 ms	10^{-6}	SIP Signaling
6		6	300 ms	10^{-6}	Video, Internet
7		7	100 ms	10^{-3}	Voice, Video, Games
8		8	300 ms	10^{-6}	Video, Internet
9		9			

Tabla 2.5: Parámetros QCI [40]

En LTE existen 9 niveles o clases diferentes de QCI, como se aprecia en la tabla 2.5 [40]. VoLTE requiere *bearers* pertenecientes al *core* IMS, estableciendo un canal básico con QCI 5 para la señalización SIP, y, posteriormente, un canal dedicado con QCI 1 para la transmisión de datos de voz (se establecerá un tercer canal con QCI 2 en caso de existir una video-llamada ViLTE [49]).

En el *release* 12 se incorporaron los valores 65 y 66 en la parte GBR, y los valores 69 y 70 para nGBR [40], atendiendo la necesidad de servicios del tipo *Push-to-talk* (pulsar para hablar), sin embargo se utilizó la tabla del *release* 11 pues dichos valores no han sido implementados aún por el *vendor* actual para los equipos de Entel, escapando del alcance de la presente memoria.

2.5. Voz sobre LTE (VoLTE)

2.5.1. ¿Qué es VoLTE?

Voice Over LTE (VoLTE) es un servicio Voice Over IP (VoIP) que, a diferencia de otras aplicaciones VoIP OTT actuales, tales como *Whatsapp*, *Skype* y *FaceTime*, este garantiza la calidad de servicio QoS. El perfil básico de VoLTE está definido por el GSMA IR.92-IMS Profile for Voice and SMS [48].

VoLTE es la respuesta adoptada por el 3GPP para las llamadas de voz en 4G LTE, dado que la red LTE carece de un núcleo CS. Producto de que la implementación de VoLTE puede ser lenta en comparación con la implementación de la red de datos de LTE (dado que VoLTE requiere implementar el *core* IMS), se adoptó el Circuit Switching Fall Back (CSFB) como el mecanismo de llamadas de voz auxiliar y mandatorio para las redes LTE.

VoLTE utiliza codificación Adaptive Multi-Rate Audio (AMR) [53], siendo recomendada la utilización de Adaptive Multi-Rate Wide Band audio codec (AMR-WB) hasta el *release* 11, sin embargo, cabe destacar que en el *release* 12 surgió una nueva familia de *codecs* llamada Enhanced Voice Services codec (EVS) [54], la cual no será abordada en la presente memoria por no estar implementada por *vendor* actual, y escapar al alcance de ésta.

2.5.2. Ventajas y Desventajas de VoLTE

Las principales ventajas y desventajas de VoLTE sobre llamadas de voz CS y otro tipo de llamadas VoIP son:

2.5.2.1. Ventajas

- Garantía de la calidad de servicio: VoLTE garantiza el nivel de QoS, a diferencia de otras aplicaciones VoIP, y no opera con el modelo *best effort*⁴.
- Voz en alta definición: VoLTE utiliza codificación AMR-WB, con una tasa típica de 12.65 Kbps, obteniendo una clara diferencia con 2G, 3G o telefonía fija no IP, las que utilizan una tasa típica de 8 Kbps (una mayor tasa permite una digitalización y posterior demodulación más exacta de las ondas de voz). Sumado a lo anterior, el rango de frecuencias también se ve incrementado de 300-3400 Hz a 50-7000 Hz, ayudando a mejorar la clasificación Mean Opinion Score (MOS)⁵.
- Conversaciones enriquecidas: VoLTE, al ser administrado por medio del sub-sistema IMS, incorpora un conjunto de servicios conocidos como RCS. Estos servicios pueden incorporar funcionalidades tales como video-llamadas, transferencia de datos, adjuntar geo-localización o imágenes a la llamada, traducción simultánea durante la misma, entre otras.
- Conexiones más rápidas: El tiempo de establecimiento de llamada con VoLTE es considerablemente menor que en las redes 2G y 3G. En los sistemas basados en CS, el tiempo de establecimiento de la llamada podía rondar los 5 a 8 segundos, mientras que en VoLTE el tiempo es inferior a 1 o 2 segundos.
- Menor consumo de batería: Las llamadas VoLTE tienen un mejor consumo de energía en comparación a otras aplicaciones VoIP OTT, como Skype o Facetime.
- Integración con Wi-Fi: VoLTE puede operar mediante una conexión Wi-Fi, con el consiguiente ahorro en la tarifa de datos.

⁴**Best-Effort:** Mecanismo o servicio de entrega de datos en el que la red no puede garantizar que los datos lleguen a destino, ni ofrecer al usuario determinado nivel de calidad de servicio en la comunicación.

⁵**Ranking MOS:** MOS es una medida de calidad de experiencia (QoE) utilizado en telecomunicaciones. Este mide la percepción del usuario de la calidad de una llamada telefónica. Su escala es: 1 Malo, 2 Pobre, 3 Razonable, 4 Bueno, 5 Excelente.

2.5.2.2. Desventajas

- Incompatibilidad de terminales móviles: No todos los terminales presentes en el mercado actual poseen la capacidad de realizar y/o recibir llamadas VoLTE. Ello implica que dichos usuarios sólo podrán realizar llamadas vía redes 2G y 3G mediante CS-Fallback.
- No todos los operadores implementan el mismo conjunto de servicios RCS, por lo que algunos servicios podrían no ser compatibles, o no estar presentes, entre operadores.
- Nuevo esquema tarifario: No existe un esquema tarifario globalmente utilizado para VoLTE, por lo que cada operador podría adoptar distintos esquemas de tarifa.

2.5.3. Requerimientos y Recomendaciones para VoLTE

2.5.3.1. Requerimientos de VoLTE

Para la implementación de VoLTE, se deben cumplir los siguientes requerimientos:

- Core IMS implementado en la red
- Señalización IMS soportada en terminal móvil UE
- ROHC habilitado
- CSFB implementado
- RLC UM *Segmentation* habilitado
- QoS *end-to-end*
- Codificación AMR
- UE con capacidad VoLTE

2.5.3.2. Recomendaciones para VoLTE

Para la implementación de VoLTE se sugiere:

- TTI *Bundling* habilitado
- *Frequency Hopping* habilitado
- SRVCC habilitado
- Codificación AMR-WB 12.65
- Frame Error Rate (FER) menor al 1 %

2.5.4. Llamada VoLTE

Para establecer una llamada VoLTE se requiere que el UE esté conectado a la red móvil (núcleo EPC), y que se establezca un canal de comunicación SIP con el *core* IMS mediante un *bearer* con QCI=5 (ver sección 2.4.1 - Bearers), y se identifique con este mediante una petición tipo *Register* (ver sección 2.2.5.1 - Señalización SIP). Una vez registrado, se enviará una petición tipo *Invite* a otro usuario registrado en la red para iniciar una llamada VoLTE. De establecerse la comunicación, se habilitará un nuevo canal dedicado para los paquetes de voz VoLTE con QCI=1. La llamada será finalizada con una petición tipo *Bye* por parte de uno de los usuarios involucrados en la llamada. El proceso anteriormente descrito puede apreciarse de forma simplificada en la figura 2.18.

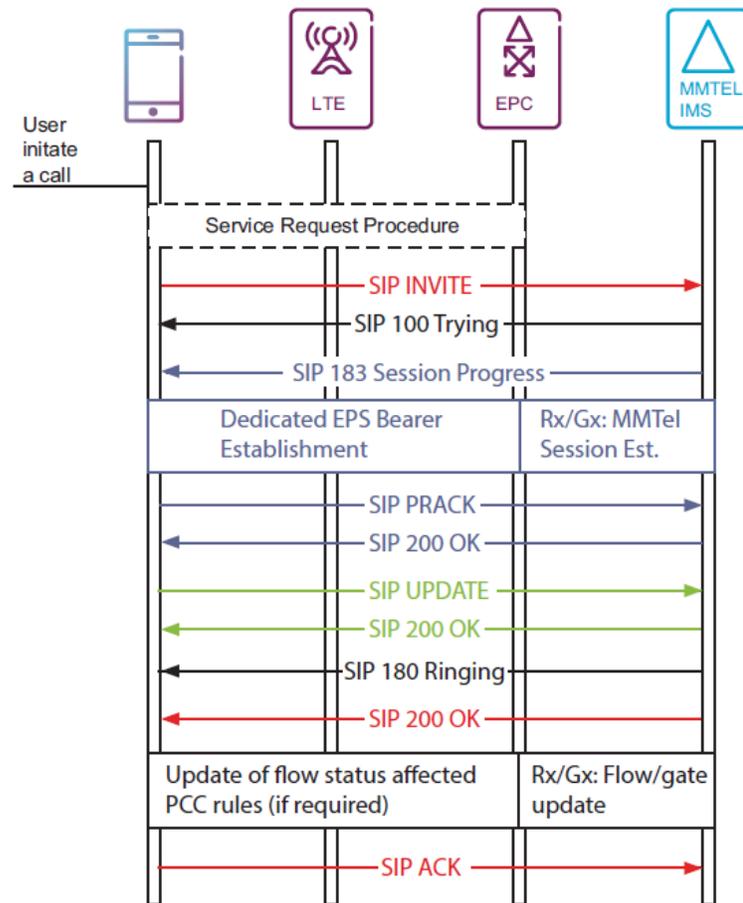


Figura 2.18: Llamada VoLTE con señalización SIP

Este procedimiento anteriormente descrito representa el flujo de una llamada VoLTE una vez el usuario ya ha establecido sesión en el núcleo IMS, e inicia una llamada VoIP en la red 4G con otro usuario registrado en el núcleo IMS, según lo descrito en el documento *GSMA VoLTE Service Description and Implementation Guidelines* [55] y *3GPP TS23.401* [38]. Otros flujos involucrados con VoLTE, tales como el flujo para la conexión del usuario con el núcleo EPC, mensajería en VoLTE, llamada de emergencia, entre otros, son explicitados y pueden ser consultados en el documento GSMA antes mencionado.

2.5.5. Otros Mecanismos de Llamadas

Además de la llamada VoLTE, existen otros dos mecanismos para las llamadas de voz sobre redes LTE: CSFB, el cuál es mandatorio para las redes LTE y funciona en la ausencia de VoLTE, y Single Radio-Voice Call Continuity (SRVCC), el cual es un mecanismo que permite mantener la continuidad de llamadas VoLTE al salir de la cobertura 4G y caer en cobertura 3G y 2G.

2.5.5.1. CS-Fallback

Circuit Switching Fall Back (CSFB) es un mecanismo de respuesta a las solicitudes de llamadas de voz y mensajería en una red LTE cuando no existe una implementación funcional del *core* IMS. En esencia, dado que una red 4G LTE no posee un núcleo de conmutación de circuitos, esta debe realizar las llamadas por conmutación de paquetes. Sin embargo, para ello se requieren varios pasos previos, tales como la implementación del core IMS. Una alternativa a ello es la implementación de CSFB, la cual traspasa las llamadas entrantes o salientes a las redes anteriores: 3G y 2G. Cuando un usuario conectado a la red 4G desea realizar una llamada, la red lo desconecta de la red LTE y lo conecta a la red 3G o 2G (red CS), mientras dure la llamada, y una vez finalizada retorna a la red 4G.

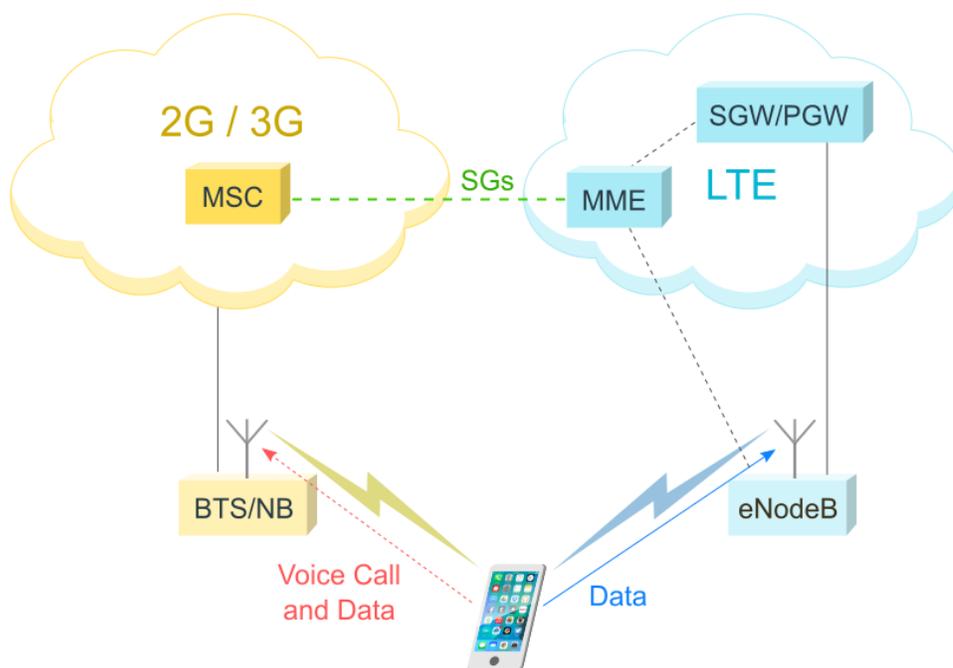


Figura 2.19: CS-Fallback

Los pasos del proceso de CSFB son:

- i Cuando CSFB está activo, el UE se registra en las dos redes: *legacy*⁶ y LTE.
- ii Para permitir una transferencia rápida hacia la red *legacy* (ya sea 2G o 3G), la red LTE necesita saber la localización del UE. Para ello, el MME, que rastrea la localización del UE en la red LTE, proporciona continuamente información de localización al Mobile Switching Center (MSC), usando la interfaz SGs.
- iii Luego, el conjunto de mensajes SGs soporta la gestión de la movilidad, los mensajes de *paging* y SMS.
- iv Cuando el UE decide originar una llamada de voz, envía un mensaje de petición de servicio al MME. El MME comprueba si el UE es capaz de realizar CSFB, y notifica al eNB para transferir el UE a la red *legacy*.
- v Antes de realizar la transferencia del UE, el eNB puede solicitar las mediciones de Radio Frequency (RF) de los eNB vecinos. El eNB entonces decide el mejor nodo para el UE y realiza la transferencia.
- vi Una vez que el UE se encuentra en la red 2G/3G, inicia el procedimiento de llamada en la red heredada.

Además, para la conexión de datos durante la llamada, existe dos alternativas:

- i La transferencia de datos es cancelada temporalmente.
- ii La transferencia de datos es entregada a la red CS, y devuelta a LTE una vez la llamada finaliza.

2.5.5.2. SRVCC

Single Radio-Voice Call Continuity (SRVCC) permite realizar el traspaso de llamadas PS (VoLTE) a llamadas de CS, es decir, a diferencia de CSFB, SRVCC habilita la continuidad de las llamadas (realiza *handover* de una llamada VoLTE a una llamada 3G o 2G cuando no existe cobertura 4G). El traspaso se realiza manteniendo la calidad de servicio QoS y asegurando que la continuidad de las llamadas cumpla con los requisitos críticos para las llamadas de emergencia. Sin embargo, debido a que la señalización requerida es complicada, es posible que exista una interrupción breve en el servicio de audio cuando la llamada está pasando a la red de conmutación de circuitos.

Cabe destacar que SRVCC puede manejar el control de las llamadas en ambas direcciones, es decir, puede traspasar una llamada desde el dominio PS al dominio CS y viceversa.

⁶Red legacy: Hace referencia a redes 2G y 3G.

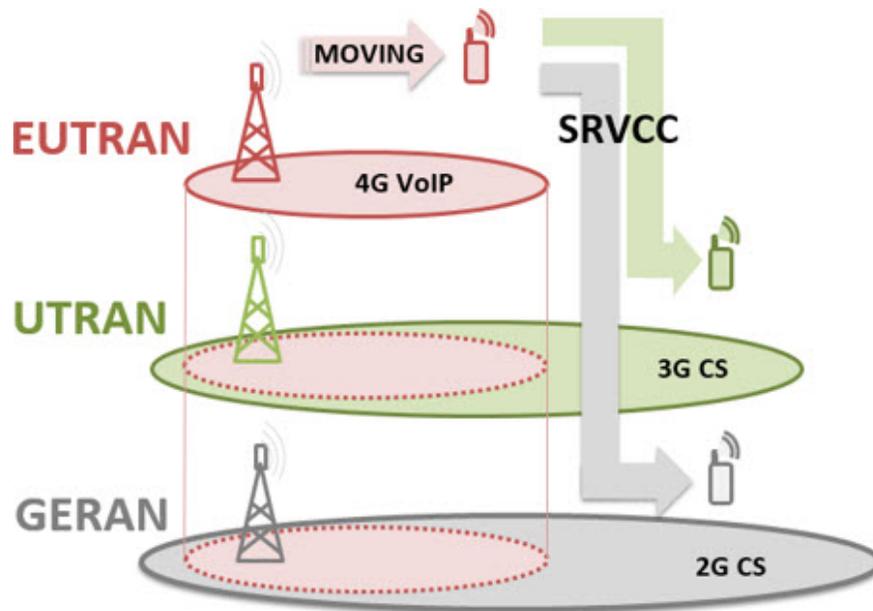


Figura 2.20: SRVCC

Los pasos del proceso de traspaso SRVCC son:

- i El proceso de transferencia es iniciado por una solicitud de transferencia de sesión desde el IMS CSCF.
- ii El IMS CSCF responde simultáneamente con dos comandos: uno a la red LTE y el otro a la red heredada.
- iii La red LTE recibe un comando de ejecución de *handover* a través del MME y del acceso RAN. Esto instruye al dispositivo del usuario a prepararse para moverse a una red de conmutación de circuitos para la llamada de voz.
- iv La red de conmutación de circuitos de destino recibe un aviso de transferencia de sesión, preparándola para aceptar la llamada desde la red LTE.
- v Después de que todos los comandos se han ejecutado, la llamada se cambia a la red heredada con el IMS CSCF todavía con el control de la llamada.

2.5.6. Features de VoLTE

Existen diversos *features* o características que pueden ser habilitadas para mejorar el rendimiento de VoLTE. Los más importantes son:

2.5.6.1. ROHC

Robust Header Compression (ROHC), detallado en el documento TS 36.323 del 3GPP [24], es una técnica de compresión de las cabeceras de paquetes IP mandatoria para VoLTE. La información de cabecera IP puede ser desproporcionadamente grande cuando se compara con los paquetes de codec VoLTE relativamente pequeños que se transmiten, creando ineficiencia en términos del ancho de banda de interfaz de aire. Por ejemplo, una combinación de encabezados Real-Time Transport Protocol (RTP), UDP e IP puede totalizar de 40 (IPv4) a 60 (IPv6) bytes de datos de encabezado, mientras que el uso de AMR-WB a 12.65 kpbs produce datos de carga útil de aproximadamente 33 bytes por trama de 20 ms. En este caso puede haber más sobrecarga transmitida que los datos de carga útil real. ROHC puede comprimir las cabeceras hasta el rango de 2 a 4 bytes, con un promedio de 3 bytes, proporcionando grandes mejoras en términos de eficiencia.

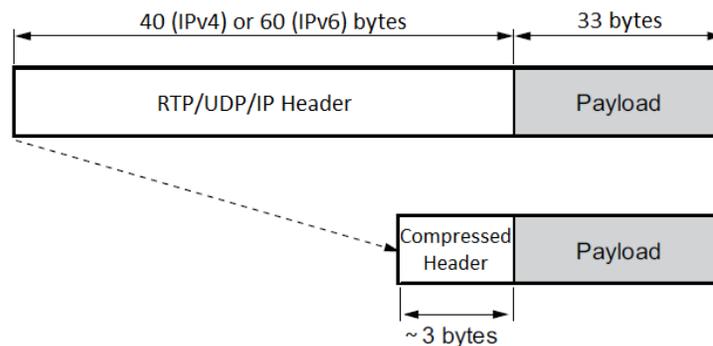


Figura 2.21: ROHC

2.5.6.2. RLC-UM Segmentation

La segmentación Radio Link Control (RLC) divide la carga (*payload*) de grandes paquetes IP en Protocol Data Units (PDU)s RLC de tamaño más pequeño como se muestra en la figura 2.22. Las unidades PDU RLC más pequeñas resultarán en bloques de transporte más pequeños, que se pueden decodificar con mayor precisión. Un inconveniente de este método es el aumento de la sobrecarga producto a las nuevas cabeceras RLC necesarias.

Radio Link Control Unacknowledged Mode (RLC-UM) [23] es un *feature* requerido en VoLTE. Este es un modo de segmentación que no requiere ninguna respuesta de recepción de la otra parte, es decir, no requiere paquetes ACK (*acknowledgement*) o NACK (*negative acknowledgement*) de la otra parte. RLC-UM ofrece un encabezado pequeño, que contiene

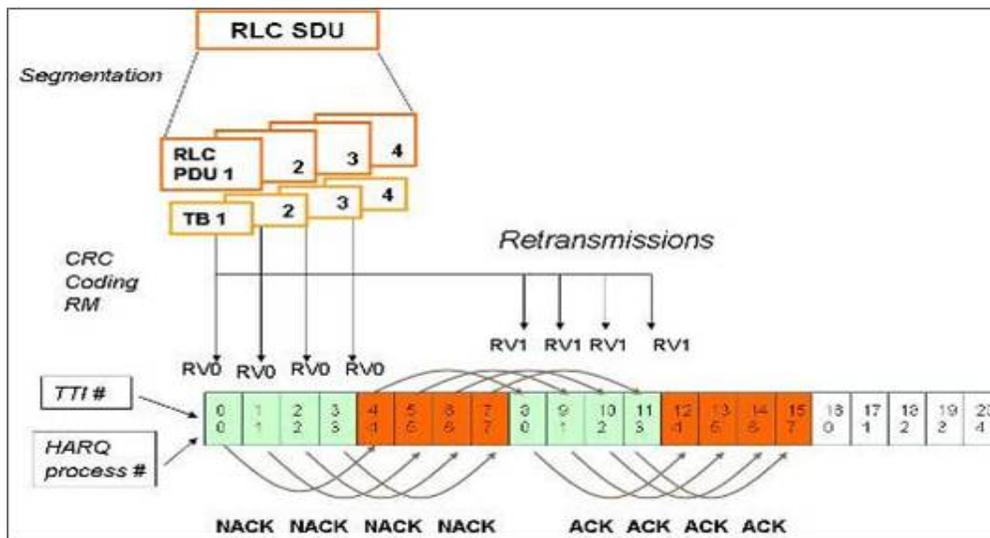


Figura 2.22: Segmentación RLC en conjunto con Agrupación TTI

información sobre segmentación, concatenación y el número de secuencia. Las funciones realizadas por RLC-UM son:

- Segmentación y reensamblaje: Si el tamaño original es demasiado grande para caber en una sola transmisión, se puede segmentarse en el lado de transmisión y volver a montarse en el lado de recepción.
- Concatenación: Se pueden combinar múltiples SDU en una sola PDU para llenar el tamaño de PDU disponible, y se pueden añadir bits de relleno para llenar la PDU disponible.
- Comprobación del número de secuencia: el encabezado RLC contiene un número de secuencia, que se utiliza durante el reensamblaje para detectar SDUs dañadas.
- Descarte de SDU: la entidad UM de transmisión puede configurarse para ejecutar un descarte de SDU basado en el *schqcheduler*. Una SDU que no se ha transmitido después de un tiempo configurable se descarta.

2.5.6.3. TTI Bundling

TTI *Bundling* es un *feature* recomendado para VoLTE que mejora la cobertura en el borde de la celda y la latencia *end-to-end*. Dado que el terminal móvil tiene una potencia limitada en el enlace ascendente (23 dBm para LTE), se puede dar lugar a muchas re-transmisiones en el borde de la celda. Re-transmisiones implica retrasos, los cuales podrían no ser aceptables para ciertos servicios tales como VoIP. Para entender la agrupación de TTI *Bundling* es necesario tener la idea básica de la Solicitud de Repetición Automática Híbrida (Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) por sus siglas en inglés) y el intervalo de tiempo de transmisión (TTI).

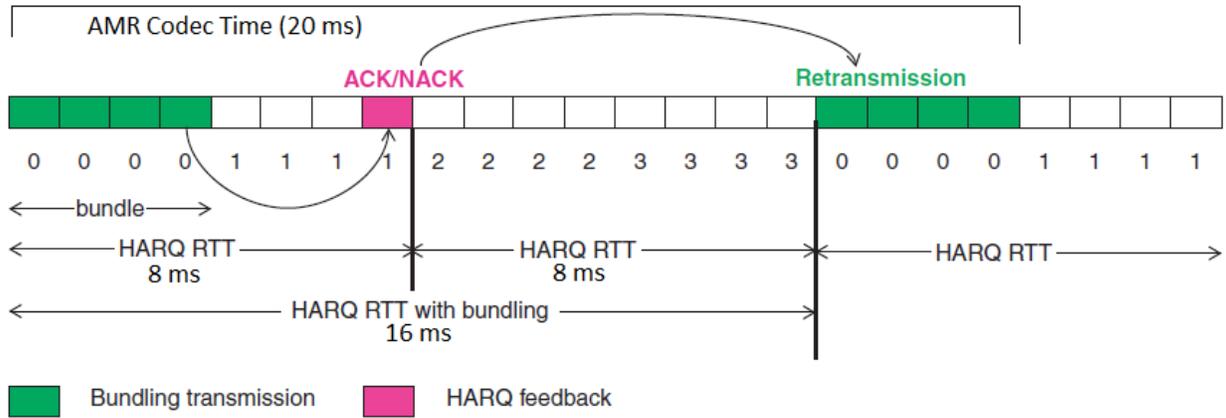


Figura 2.23: TTI Bundling

HARQ es un proceso en el que los datos de la capa MAC están protegidos de los canales inalámbricos ruidosos a través de un mecanismo de corrección de errores. Hay un par de versiones diferentes de HARQ pero en VoLTE se tiene un tipo conocido como *'Incremental Redundancy Hybrid ARQ'*: Cuando el receptor detecta datos erróneos, no los descarta, este espera a que el remitente reenvíe los mismos datos, esta vez con un nuevo conjunto de bits de codificación. De esta forma, el receptor combinará los datos erróneos recibidos primeramente con los datos reenviados por el remitente. El proceso se repetirá siempre y cuando el receptor no pueda decodificar los datos. La ventaja de este método es que con cada re-transmisión, la velocidad de codificación se reduce.

TTI es la unidad de tiempo más pequeña en LTE para la asignación de recursos, en donde el eNB es capaz de programar a cualquier usuario para la transmisión de enlace ascendente o descendente (1 ms).

TTI Bundling, en lugar de volver a transmitir los datos erróneos con un nuevo conjunto de bits codificados, envía versiones repetidas del mismo. De esta forma se evita el retardo y se reduce la sobrecarga del plano de control en la capa MAC. Se aprecia el concepto de forma visual en la figura 2.23.

TTI Bundling fue introducido en el *release 8* del 3GPP, y está restringido a *bundles* de 4 TTIs, modulación QPSK, y a un máximo de 3 PRBs. En el *release 12*, se introdujo algunas mejoras, creando el denominado *TTI Bundling Enhanced*, sin embargo, y dado que éste no ha sido habilitado por el *vendor* actual en sus equipos, este no será abordado.

TTI Bundling sólo afecta el enlace ascendente, y se activa bajo restricciones en la calidad de la señal, típicamente con un Signal to Interference-plus-Noise Ratio (SINR) umbral.

En la figura 2.24 se puede apreciar la adición de las cabeceras al *payload*, la compresión ROHC, y la utilización de RLC *segmentation* con TTI *bundling*.

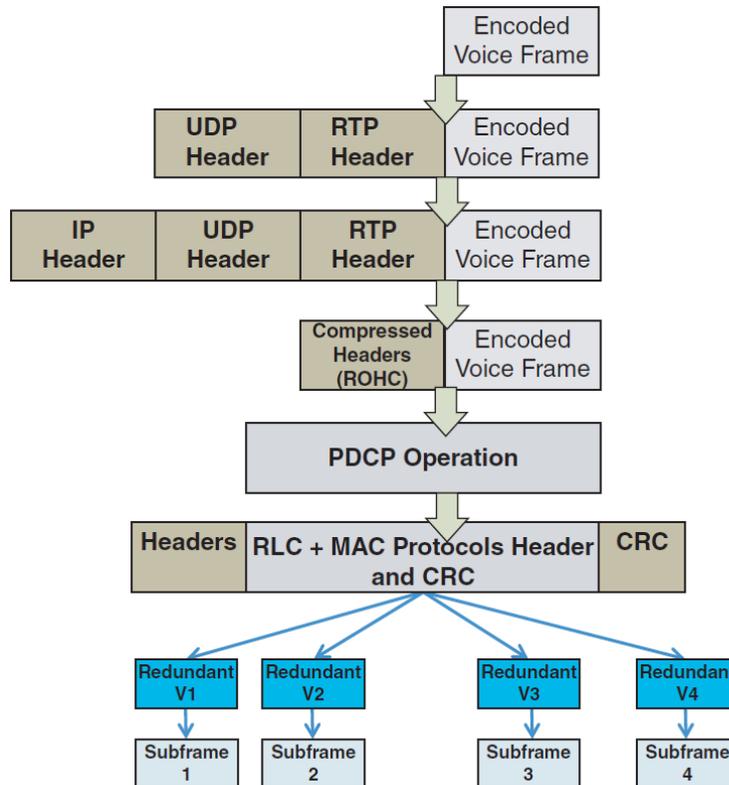


Figura 2.24: Paquete VoIP con RoHC+RLC+TTI Bundling

2.5.6.4. Frequency Hopping

Frequency Hopping (FH) [12, 14], en español, Salto de Frecuencia, es una opción para el canal PUSCH en el enlace de subida. Cuando FH está habilitado, los bloques de recursos físicos se asignan desde los bloques de recursos virtuales asignados sobre la base de una configuración pre-configurada por el UE y el eNB. En términos simples, la transmisión PUSCH saltará de recurso físico (PRB) dentro de una, o entre, subtramas (*subframe* de 1ms), ayudando a evitar posibles conflictos de frecuencia o recursos.

Existen varias configuraciones de salto posibles: La primera, llamada *Intra-FH*, el salto de frecuencia o recurso físico se realizará dentro de una subtrama, es decir, cambiará de Radio Bearer (RB) virtual asignado dentro de la misma subtrama. La segunda, llamada *Inter-FH*, el salto de frecuencia se realiza entre subtramas, es decir, se espera a que finalice una subtrama para realizar el salto de frecuencia. Además, es posible invertir el orden del llenado de la información dentro del recurso físico RB, a lo cual se le llama Reflejo (*textitmirroring*).

Para LTE, existen dos tipos de saltos de frecuencia: Tipo 1 y Tipo 2 [56]. En el tipo 1, el desplazamiento de frecuencia entre la primera ranura y la segunda ranura está determinado explícitamente el *scheduler*, entregando la cantidad de saltos y el desplazamiento de frecuencia entre ellos. En el tipo 2, el desfase de frecuencia entre la primera ranura y la segunda ranura está configurado por un patrón predefinido pseudo-aleatorio, el cual depende de la celda eNB. De ésta forma, la principal diferencia entre ambos tipos es que el primero se puede ver como un salto constante, en tanto que el segundo como un salto aleatorio [57, 58].

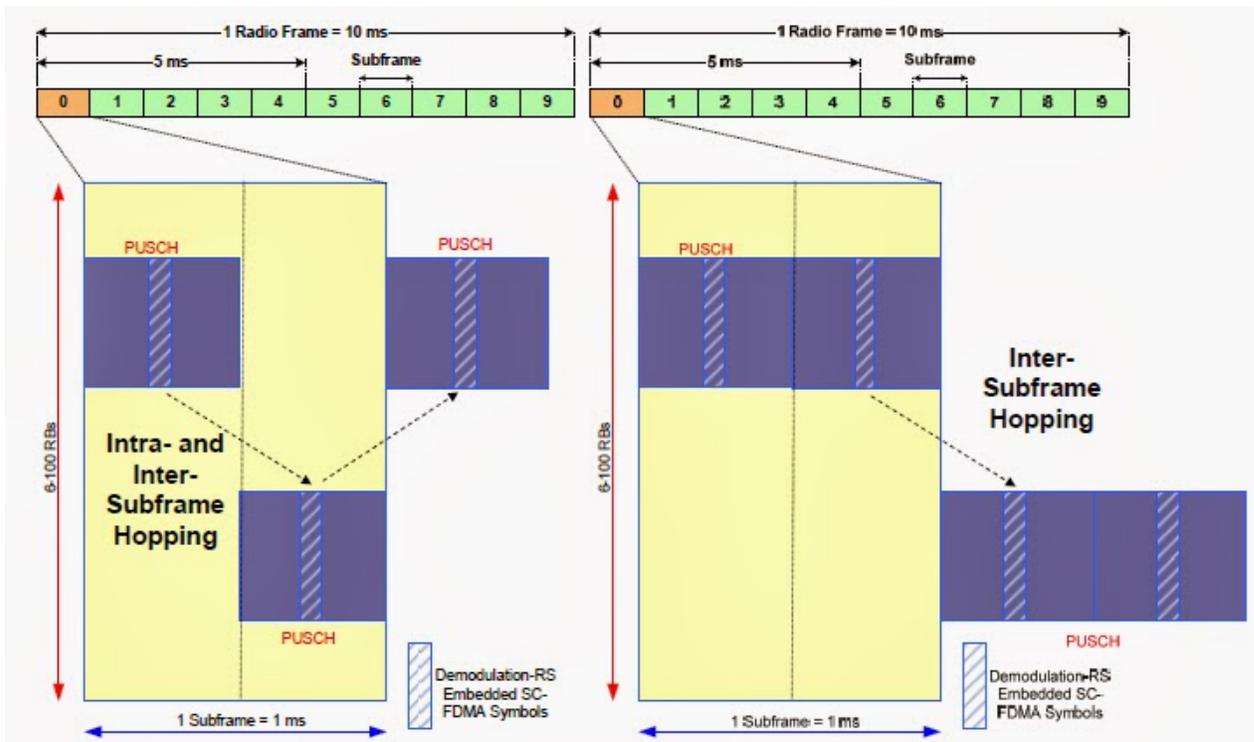


Figura 2.25: Modos Intra e Inter *Frequency Hopping*

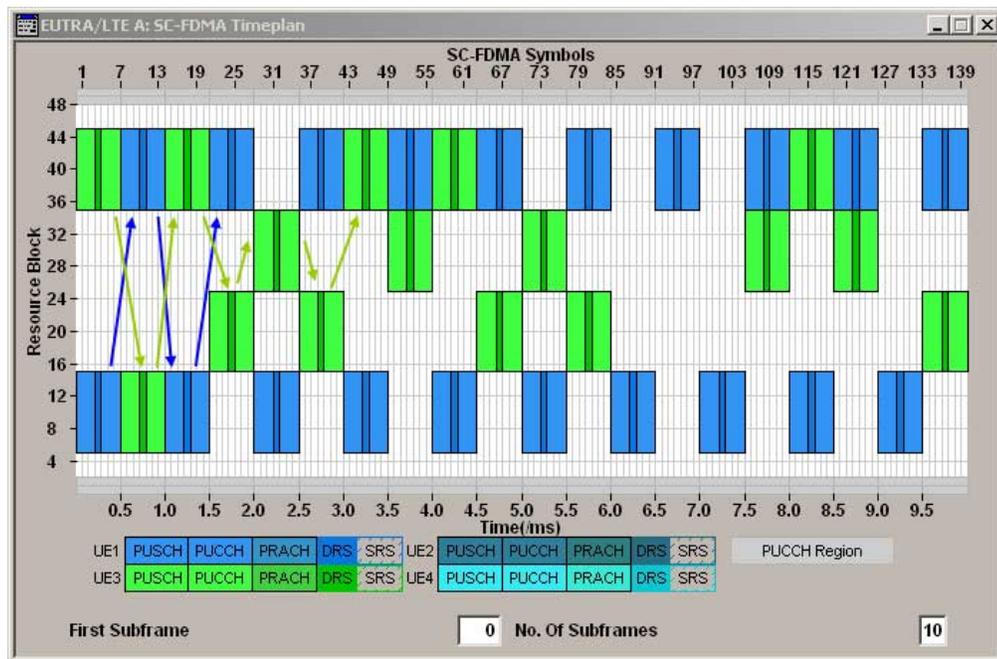


Figura 2.26: *Frequency Hopping* tipo 1 (celeste) y tipo 2 (verde)

2.6. Link Budget

Link Budget es el cálculo de todas las ganancias y pérdidas, entre dos nodos, donde se desea establecer un enlace a través del algún medio. En el caso de las redes móviles, el enlace se realiza entre la estación celular base y el terminal móvil, con un enlace de bajada (*downlink*) y un enlace de subida (*uplink*). El *link budget* estima los niveles de potencia de señal requeridos mediante el cálculo de la pérdida de trayectoria máxima permisible (Maximum Allowable Path Loss (MAPL)). De forma general, un *link budget* tiene la forma de la ecuación 2.1.

$$\text{Potencia Percibida} := \text{Pot.Transmitida} + \text{Ganancias} - \text{Perdidas} \quad (2.1)$$

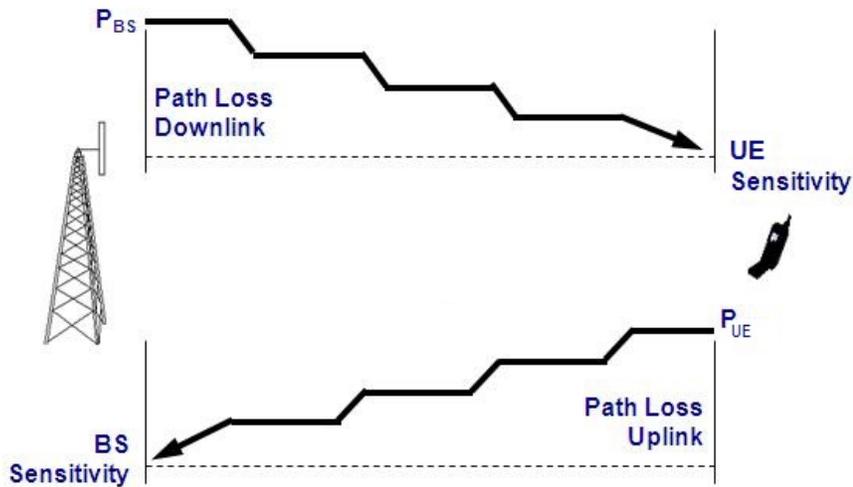


Figura 2.27: Visualización de un Link Budget

Durante el análisis de un *link budget* se debe realizar y documentar varias suposiciones, las cuales se concentran en algunos escenarios que representan el área de despliegue. Producto de ello, un inconveniente en la confección de estos, es que presentan una visión simplificada de la red, por lo que los supuestos deben ser seleccionados con la mayor precisión posible para obtener un modelo que sea capaz de representar la red real.

Un supuesto clave comúnmente utilizado es la homogeneidad de los parámetros en todas las celdas celulares. En una red desplegada, las interferencias varían para cada usuario y cada celda debido a los diferentes fabricantes de UE, controles de potencia imperfecto, condiciones de canal diferentes, diferentes configuraciones de RF y diferentes velocidades de transferencia.

Típicamente un *link budget* se confecciona en una hoja de cálculo, el cual posteriormente es validado y ajustado mediante simulaciones.

2.6.1. Link Budget en LTE

El *Link Budget* de LTE se diseña en función de la velocidad de transmisión para un usuario que se encuentra en el borde de celda, con el fin de garantizar una mínima velocidad de bajada y subida. Por lo general existirá un *link budget* de subida (*uplink*) y otro de bajada (*downlink*).

En LTE, el *link budget* busca determinar el MAPL, es decir, el mayor valor de pérdida de trayecto que se pueda tener, de forma bidireccional entre el terminal móvil y la estación celular para el usuario del borde de celda. Con este dato, se utilizan modelos de propagación de radio, y *softwares* de simulación para obtener las coberturas del servicio.

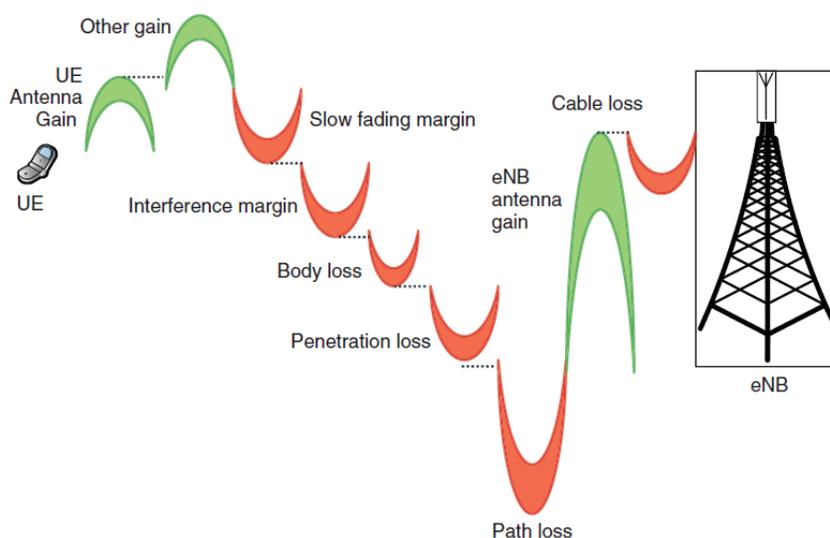


Figura 2.28: LTE Uplink Link Budget

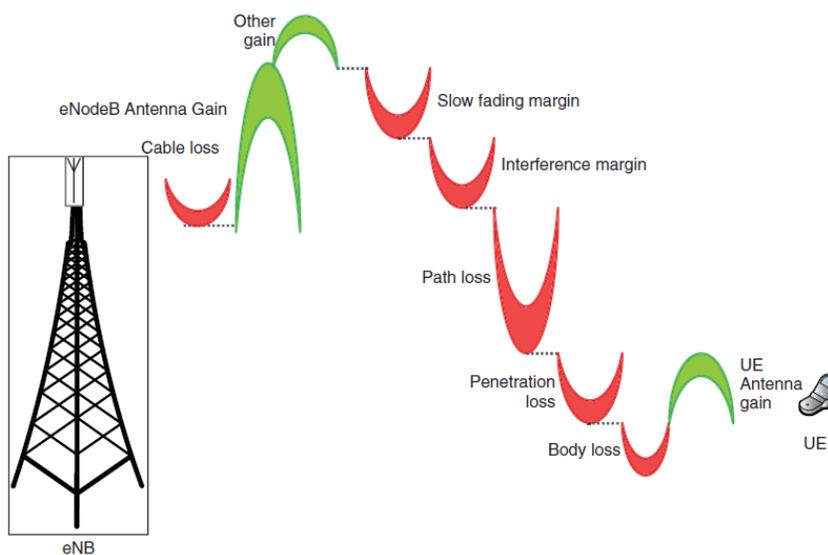


Figura 2.29: LTE Downlink Link Budget

En la tabla 2.6 se muestra un *link budget* simplificado para la tecnología 4G LTE.

Item	Formulas
Data Channel Type	Physical UL/DL Shared Channel
Duplex Mode	FDD: Frequency Division Duplexing
User Environment	
System Bandwidth (MHz)	
Cell Edge Rate (kbps)	
	Tx
Max Total Tx Power (dBm)	A
Allocated RB	B
RB to Distribute Power	C
Subcarriers to Distribute Power	$D = 12 \cdot C$
Subcarrier Power (dBm)	$E = A - 10 \cdot \log_{10}(D)$
Tx Antenna Gain (dBi)	G
Tx Cable Loss (dB)	H
Tx Body loss (dB)	I
EIRP per Subcarrier (dBm)	$J = E + G - H - I$
	Rx
SINR (dB)	K
Rx Noise Figure (dB)	L
Receiver Sensitivity (dBm)	$M = K + L - 174 + 10 \cdot \log_{10}(15000)$
Rx Antenna Gain (dBi)	N
Rx Cable Loss (dB)	O
Rx Body loss (dB)	P
Target Load	
Interference Margin (dB)	Q
Min. Signal Reception Strength (dBm)	$R = M - N + O + P + Q$
	Path Loss & Cell Radius
Indoor Penetration Loss (dB)	S
Std. Dev. of Shadow Fading (dB)	
Area Coverage Probability	
Shadow Fading Margin (dB)	T
Maximum Allowable Path Loss (dB)	$U = J - R - S - T$
eNodeB/UE Antenna Height (m)	
Cell Radius (km)	

Tabla 2.6: LTE Link Budget Simplificado

Se procede a describir cada ítem del *Link Budget* expuesto en la tabla 2.6.

- **Data Channel Type** (Tipo de canal de datos): Es una descripción del tipo de canal utilizado en el *link budget*. Se usa típicamente para indicar si es un *link budget* de subida o bajada. Para *uplink* se utiliza el canal PUSCH, en tanto que para el *downlink* se utiliza el canal PDSCH.
 - **Duplex Mode** (Tipo de duplexación): Hace referencia al tipo de duplexación utilizada. Éste puede ser FDD o TDD, dependiendo si la duplexación es en frecuencia o en tiempo, respectivamente.
 - **User Environment** (Entorno): Descripción del tipo de demografía utilizada. Este puede ser Denso Urbano (DU), Urbano (U), o Rural (R). Este dato es posteriormente utilizado para determinar los parámetros a ser utilizados en el modelo de propagación de radio.
 - **System Bandwidth** (Ancho de banda del sistema): Medida del ancho de banda disponible del sistema o red. Este es medido en [MHz] y para 4G LTE tiene posibles valores fijos: 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz.
 - **Cell Edge Rate** (Velocidad en borde de celda): Velocidad de transferencia para un usuario en el borde de celda. El *link budget* de datos o *best effort* es diseñado en torno a este valor y se puede medir en [Kbps] o en [Mbps].
- a) **Max Total Tx Power** (Máxima potencia total transmitida): Corresponde a la potencia máxima transmitida por las antenas emisoras. Esta potencia depende netamente del hardware utilizado.
 - b) **Allocated PRB** (PRBs utilizados): PRBs destinados o utilizados por un usuario. Es la cantidad de recursos (PRB) que se le asigna a un usuario en una unidad de tiempo TTI.
 - c) **PRB to Distribute Power** (PRBs en que se distribuye la potencia): PRBs totales en que se distribuye la potencia de la antena emisora.
 - d) **Subcarriers to Distribute Power** (Subportadoras en que se distribuye la potencia): Corresponde a la cantidad de subportadoras en que se divide la energía de forma homogénea.
 - e) **Subcarriers Power** (Potencia de las subportadoras): Corresponde a la potencia que se transmite por cada subportadora. Se mide en [dBm].
 - f) **Tx Antenna Gain** (Ganancia de la antena transmisora): Corresponde a las ganancias que pueda tener el sistema de antena transmisora. Se mide en [dBi].
 - g) **Tx Cable Loss** (Pérdidas por cable): En este ítem se agrupan las pérdidas en la línea de transmisión. Las pérdidas pueden ser debido a conectores, pérdidas de cable, entre otras. Estas son medidas en [dB].
 - h) **Tx Body Loss** (Pérdidas de cuerpo en el emisor): Pérdidas provocadas por el cuerpo

humano. Estas pérdidas dependen de la frecuencia de la portadora y si el celular se usa pegado a la cabeza (como en una llamada) o no. Se mide en [dB].

- i) **EIRP** (Potencia radiada isotrópica equivalente): Effective Isotropic Radiated Power (EIRP) es la potencia total irradiada desde el sistema transmisor como si se tuviera una antena isotrópica. Este es el primer punto importante en un *link budget*.
- j) **Rx Target SINR** (Ratio señal a ruido-interferencia objetivo): Corresponde al valor deseado de señal en el extremo receptor, considerando tanto el ruido como la interferencia de otras celdas. Se mide en [dB].
- k) **Rx Noise Figure** (Figura de ruido del receptor): Corresponde a las pérdidas por ruido interno del receptor. Depende de la frecuencia en que se trabaje. Se mide en [dB].
- l) **Rx Sensitivity** (Sensibilidad del receptor): Corresponde al nivel de señal con que el aparato receptor es capaz de decodificar exitosamente los paquetes de información enviados por el aparato emisor. Se mide en [dBm].
- m) **Rx Antenna Gain** (Ganancia de la antena receptora): Corresponde a las ganancias que pueda tener el sistema de antena receptora. Se mide en [dBi].
- n) **Rx Cable Loss** (Pérdidas por cable): En este ítem se agrupan las pérdidas en la línea de transmisión receptora. Las pérdidas pueden ser debido a conectores, pérdidas de cable, entre otras. Estas son medidas en [dB].
- ñ) **Rx Body Loss** (Pérdidas de cuerpo en el receptor): Pérdidas provocadas por el cuerpo humano. Estas pérdidas dependen de la frecuencia de la portadora y si el celular se usa pegado a la cabeza (como en una llamada) o no. Se mide en [dB].
- o) **Target Load** (Carga Objetivo): Porcentaje de uso sobre la radio base. Se utiliza para simular un nivel de ocupación de la radio base.
- p) **Interference Margin** (Margen de interferencia): Margen en [dB] dado para simular las pérdidas que se tienen debido a la interferencia de celdas cercanas.
- q) **Min. Signal Reception Strength** (Señal mínima de recepción): Nivel mínimo de señal para que el receptor sea capaz de decodificar los mensajes transmitidos del emisor. Se mide en [dBm].
- r) **Indoor Penetration Loss** (Pérdidas de penetración): Pérdidas producidas por la penetración de la señal a edificaciones. Se utiliza para dar cobertura *indoor*. Se mide en [dB].
- s) **Std. Dev** (Desviación estándar): Desviación estándar del modelo de *shadow fading*. Se utiliza para calcular el margen en [dB] para el *shadow fading*.
- t) **Area coverage probability** (Probabilidad de cobertura de área): Es la probabilidad de cobertura deseada sobre la celda.

- u) **Shadow Fading Margin** (Margen para el *shadow fading*): Margen en [dB] para el desvanecimiento del tipo *shadow fading*. *Shadow fading*, también conocido como *slow fading* (desvanecimiento lento), es provocado por la obstrucción debido a un edificio o una característica natural.
- v) **Maximum Allowable Path Loss** (Pérdida de trayectoria máxima): Mejor conocida como (MAPL), es la máxima pérdida por trayectoria para asegurar señal. Se mide en [dB].
- w) **eNB and UE Antenna Height** (Altura del eNB y del terminal): Altura en [m] del eNB y del terminal móvil. Se utiliza en el modelo de propagación de radio.
- x) **Cell Radius** (Radio de celda): Es el radio de cobertura que brinda la celda. Este se calcula a partir del MAPL. Se mide en [m].

2.6.2. Consideraciones para el Link Budget de VoLTE

Se presentan algunas diferencias entre el *link budget* de VoLTE y el *link budget Best Effort* a tener en consideración para el diseño:

1. A diferencia del *link budget* de datos, el *link budget* de VoLTE se debe diseñar en base a un valor de SINR que permita mantener la llamada VoLTE, sin considerar las velocidades de subida y/o bajada. Un valor adecuado de SINR garantizará las velocidades requeridas por la llamada VoLTE.
2. El *Body Loss*, o pérdida de cuerpo, deja de ser 0 dB, y toma un valor que va desde los 1 dB hasta los 9 dB, dependiendo mayormente de la frecuencia utilizada. Lo anterior se debe a que en una llamada el terminal móvil es llevado al costado de la cabeza, la cual genera una gran pérdida.
3. Algunos *features* para mejorar la cobertura, tales como TTI Bundling, deben ser incorporados en el valor de SINR.

Capítulo 3

Metodología

En el presente capítulo se realiza el diseño del *Link Budget* LTE para VoLTE. Para ello en el punto 3.1 se realiza un dimensionamiento de la llamada VoLTE, luego, en el punto 3.2, se detalla cada variable involucrada en el cálculo del *link budget* con su rango de valores posibles y valor selecto. Finalmente, en el punto 3.3, se muestra un cuadro resumen de los valores obtenidos en el punto anterior y se comparan con valores de *link budgets* diseñados por la empresa proveedora de los equipos para la red 4G de Entel y la empresa consultora contratada por Entel para la implementación de VoLTE.

3.1. Dimensionamiento VoLTE

VoLTE se transmite por paquetes IP, y por ende, es importante determinar el tamaño de dicho paquete para así poder determinar la cantidad máxima de llamadas que se podrá tener por celda.

3.1.1. Codec de Audio

La codificación de audio influirá tanto en el tamaño de los paquetes de datos, como en la calidad de audio. VoLTE se transmite por medio de un *codec* del tipo AMR, el cuál posee dos tipos o modos: Adaptive Multi-Rate Narrow Band audio codec (AMR-NB) [59] o de banda estrecha, y AMR-WB [60] o de banda ampliada.

Entre ambos tipos, destaca la gran calidad de audio que posee AMR-WB, obteniendo una gran mejora respecto a AMR-NB, diferencia medida por el indicador MOS [61]. Es por ello que VoLTE se ideó para utilizar AMR-WB, utilizando de forma predeterminada los *codecs*: AMR-WB 12.65, AMR-WB 8.85, AMR-WB 6.60.

Codec Mode	Source codec bit-rate
AMR-NB 12.20	12.20 Kbps
AMR-NB 10.20	10.20 Kbps
AMR-NB 7.95	7.95 Kbps
AMR-NB 7.40	7.40 Kbps
AMR-NB 6.70	6.70 Kbps
AMR-NB 5.90	5.90 Kbps
AMR-NB 5.15	5.15 Kbps
AMR-NB 4.75	4.75 Kbps
AMR SID	1.80 Kbps

Tabla 3.1: Tabla de AMR-NB *codecs*

Codec Mode	Source codec bit-rate
AMR-WB 23.85	23.85 Kbps
AMR-WB 23.05	23.05 Kbps
AMR-WB 19.85	19.85 Kbps
AMR-WB 18.25	18.25 Kbps
AMR-WB 15.85	15.85 Kbps
AMR-WB 14.25	14.25 Kbps
AMR-WB 12.65	12.65 Kbps
AMR-WB 8.85	8.85 Kbps
AMR-WB 6.60	6.60 Kbps
AMR SID	1.75 Kbps

Tabla 3.2: Tabla de AMR-WB *codecs*

De la tabla 3.2, se puede apreciar que los *codecs* 12.65, 8.85 y 6.60 se encuentran destacados con color verde, esto es porque pertenecen a la configuración A¹, la cual es mandatoria para configuraciones multi-tasa. Además, los *codecs* 8.85 y 6.60 serán necesarios para realizar SRVCC de 4G a redes 3G. Cabe mencionar que SID (*Silence Indicator*) es el *frame* de silencio transmitido.

¹Configuraciones AMR-WB: Se establecen 3 configuraciones para *codecs* AMR-WB según el documento ETSI TS 26.103: Configuración A con tasas 6.6, 8.85 y 12.65, configuración B con tasas 6.6, 8.85, 12.65 y 15.85, y Configuración C con tasas 6.6, 8.85, 12.65 y 23.85.

3.1.2. Indicador de Calidad del Canal (CQI)

Antes de poder calcular el tamaño de un paquete VoLTE, es necesario conocer el Channel Quality Indicator (CQI). CQI es un indicador introducido por el 3GPP como medida de calidad del canal. Ésta medida es constantemente reportada por el terminal móvil UE a la antena base eNB. Dado que el 3GPP no definió una forma única de calcular el CQI, es común que distintos fabricantes de terminales móviles calculen este indicador de forma distinta.

Dado que no existe una ecuación explícita y oficial para este indicador, se indica que el valor CQI es tal que debe existir una probabilidad de al menos un 90 % para transmitir el bloque de datos correspondiente, es decir, un Block Error Rate (BLER) de un 10 %.

En la tabla 3.3 se presenta las características y parámetros utilizados por cada nivel de CQI (del 1 al 15) informado por el terminal móvil al eNB [14]. En esta tabla se puede apreciar la modulación que cada nivel de CQI posee, el *coding rate* o tasa de codificación del nivel, y tasa de eficiencia²

CQI Index	Modulation	Code Rate x 1024	Efficiency
0	out of range		
1	QPSK	78	0.1523
2	QPSK	120	0.2344
3	QPSK	193	0.3770
4	QPSK	308	0.6016
5	QPSK	449	0.8770
6	QPSK	602	1.1758
7	16QAM	378	1.4766
8	16QAM	490	1.9141
9	16QAM	616	2.4063
10	64QAM	466	2.7305
11	64QAM	567	3.3223
12	64QAM	666	3.9023
13	64QAM	772	4.5234
14	64QAM	873	5.1152
15	64QAM	948	5.5547

Tabla 3.3: Características de los niveles de CQI para red LTE

A partir de un nivel de CQI se obtiene la modulación utilizada y la tasa de codificación, siendo estos dos parámetros muy importantes para determinar la velocidad de transmisión. La modulación determinará cuántos bits son enviados por símbolo (2 bits en QPSK, 4 bits con 16QAM y 8 bits con 64QAM).

²Tasa de Eficiencia: División entre la cantidad de información útil receptionada, y la cantidad total de información receptionada. Para el presente cálculo corresponde a $[\text{Modulación} \times \text{Code Rate} / 1024]$.

3.1.3. Tamaño del paquete VoLTE

Se requiere conocer cuántos bloques de recursos físicos (PRB) son necesarios para entregar el tráfico para una llamada VoLTE. Para ello se calcula en base al uso de codec AMR-WB 12.65.

El codificador AMR-WB 12.65 genera 253 bits de voz codificados y enviados cada 20 ms. Para entregar cada muestra de voz al UE, se necesitan encabezados de protocolo adicionales: una cabecera RTP (12 bytes), una cabecera UDP (8 bytes) y una cabecera IPv6 (40 bytes). Esto lleva la longitud total del paquete hasta unos 733 bits cada 20 ms. Sin embargo ROHC comprimirá las cabeceras RTP, UDP e IP en una cabecera ROHC mucho más pequeña, antes de que el paquete sea transmitido por la interfaz aire. La longitud del encabezado ROHC variará dependiendo de las circunstancias particulares, pero promediará alrededor de 3 bytes (24 bits). Posteriormente las capas RLC y MAC agregarán su propia sobrecarga, que sumadas al protocolo PDCP suman 3 bytes. Finalmente se debe considerar el espaciado y el Cyclic Redundancy Check (CRC) sumando 40 bits entre ambos, obteniendo como resultado final un **paquete de 352 bits** a ser codificados y enviados por la interfaz aérea cada 20 ms. Un cálculo análogo es realizado en el documento del *vendor* actual [62]³, y en el libro de Christopher Cox[2]⁴, donde se calcula una tasa requerida de 17,6 kbps.

Un único PRB tiene 12 sub-portadoras, cada una transportando 14 símbolos en el transcurso de 1 ms, obteniendo 168 Resource Element (RE) por ms. Algunos de esos REs están ocupados por las señales de referencia PDCCH y de enlace descendente, dejando en promedio 120 REs por PRB para transportar datos en el enlace PDSCH. Limitándonos a un enlace de mala calidad (borde de celda), se tendrá modulación QPSK, obteniendo 2 bits por cada RE, sin embargo, algunos de esos bits serán bits de datos y otros serán bits de protección de errores. Luego, para determinar cuál es la cantidad efectiva de bits transmitidos, es necesario determinar el nivel CQI utilizado.

³Punto 2.2 del documento del Vendor.

⁴Tabla 23.6 del libro de Christopher Cox.

MCS Index I_{MCS}	Modulation Order Q_m	TBS Index I_{TBS}
0	2	0
1	2	1
2	2	2
3	2	3
4	2	4
5	2	5
6	2	6
7	2	7
8	2	8
9	2	9

I_{TBS}	N_{PRB}		
	1	2	3
0	16	32	56
1	24	56	88
2	32	72	144
3	40	104	176
4	56	120	208
5	72	144	224
6	328	176	256
7	104	224	328
8	120	256	392
9	136	296	456

Tabla 3.4: Tamaño (bits) del bloque de transporte

Retomando la suposición de borde de celda, se puede asumir modulación QPSK y por ende niveles de CQI entre 1 y 6. Consultando el documento 3GPP TS36.213 [14] se puede hacer la relación entre las tablas para relacionar la modulación con el tamaño del bloque de transporte como se aprecia en la tabla 3.4.

La tabla 3.4 es un extracto de las tablas 7.1.7.1-1 y 7.1.7.2.1-1 del documento TS 36.213 del 3GPP [14]. En la parte izquierda se aprecian los índices Modulation and Coding Scheme (MCS) y Transport Block Size (TBS), además del orden de modulación (2 para QPSK). En el lado derecho, se relaciona el índice TBS con el tamaño del bloque de transporte, dada una cantidad de PRBs (en este caso de 1 a 3 PRBs). En color rojo se destaca un valor no corregido por el 3GPP y que no corresponde a un valor factible, en tanto que en verde claro se destacan los valores mínimos en que, bajo un dimensionamiento optimista, un paquete VoLTE podría transmitirse, y en color verde oscuro bloques de transporte que permiten el transporte de paquetes VoLTE bajo el dimensionamiento aquí realizado.

A partir de los cálculos previamente realizados, y de la tabla 3.4, se verifica que **son necesarios 3 PRBs**, con un valor aproximado de CQI de 5 o 6, para transportar los paquetes VoLTE (esto equivale a un índice MCS 8). Sin embargo hay que recalcar que este cálculo ha sido aproximado y además tiene componentes variables, por lo que el tamaño real del paquete podría variar entre 296 bits y 392 bits. Por ejemplo, en el *paper* de Elias Jailani [63]⁵ se utiliza un tamaño de paquete VoIP de 331 bits, y en el documento *online* de LteUniversity[64] se calculó 733 bits sin compresión y 300 bits con compresión ROHC, lo cual estaría en el límite de tamaño para poder entrar en 2 PRBs.

⁵Tabla 3 del paper de Elias Jailani.

3.2. Diseño Link Budget de VoLTE

Para el diseño del *link budget*, se tomó la estructura utilizada en la tabla 2.6, la cual fue ajustada para coincidir con la estructura utilizada por el *vendor* actual y el consultor de VoLTE. El nuevo formato de *link budget* VoLTE fue diseñado considerando el valor SINR como principal parámetro de diseño (en vez del *cell edge throughput* como se realiza para *link budgets* LTE de datos), y considerando los cálculos de las variables por PRB. Además de los cambios anteriores, algunas variables o parámetros serán renombrados y/o agrupados bajo otros parámetros, con el fin de mantener la simplicidad y limpieza del cálculo.

En las siguiente sub-sección se plantearán las premisas o simplificaciones adoptadas para el diseño del *link budget*. En tanto que en las siguientes sub-secciones se listarán cada una de las variables involucradas en el *link budget*, y se mostrará una tabla resumen del valor selecto para dicha variable, tanto para la banda 2600 [MHz] como para la banda 700 [MHz], y para ambos enlaces, descendente (*downlink*) y ascendente (*uplink*).

El listado de variables consideradas se lista a continuación en la tabla 3.5. Los valores destacados en azul son valores calculados en base a la suma de las otras variables, y por tanto son sub-totales del *link budget*.

Variables
nPRB
Tx Power/PRB
Antenna Gain
Feeder Losses
EIRP
Rx Noise Figure
Thermal Noise Density
Noise Floor
Interference Margin (IM)
Antenna Diversity Gain
<i>VoLTE Gain Features</i>
SINR
Body Loss Margin
Rx Sensitivity
Log-Normal Fading Margin (LNF)
Building Penetration Margin
Total Margins
MAPL

Tabla 3.5: Variables consideradas en el cálculo del Link Budget

En tanto que en la figura 3.1 se aprecia la plantilla excel generada para desarrollar el *link budget*. Éste diseño de plantilla fue automatizado para cargar los datos de las redes LTE 700 y 2600 MHz de Entel, y será la principal herramienta utilizada para el cálculo del *link budget* de VoLTE. El archivo excel generado es, además, el principal entregable para Entel.

LINK BUDGET VOLTE

Input Parameters			
Frequency	700	MHz	
Band With (BW)	15	MHz	
Cyclic Prefix	Normal	-	
BS MIMO Type	2T2R	-	
UE MIMO Type	1T2R	-	
VoLTE TTI Bundling+RLC Segmentation	yes	-	
VoLTE Frequency Hopping	no	-	
VoLTE AMR-WB Codec	12,65	Kbps	
VoLTE cell-edge reliability	95	%	
Morphology	Dense Urban	-	
DL SINR calculation [dB]	Ericsson		x
UL SINR calculation [dB]	Ericsson		x
DL IM calculation [dB]	Manual		3
UL IM calculation [dB]	Manual		3
DL allocated PRBs	10	#	
UL allocated PRBs	2	#	
DL cell load	70	%	
UL cell load	50	%	
Antenna Heigh	25	m	
UE Heigh	1,5	m	

Item	Downlink	Uplink	Unit
Transmitter			
a1	TX maximum transmission power	40,00	0,20 [W]
a2	TX maximum transmission power	46,0	23,0 [dBm]
a3	TX max. transmission power per antenna	43,0	23,0 [dBm]
a	TX output power per RB	24,3	20,0 [dBm]
b	TX antenna gain	16,0	-1,0 [dBi]
c1	TX connectors, combiners & jumpers loss	0,5	0,0 [dB]
c2	TX cable loss	0,0	0,0 [dB]
c	TX total losses	0,5	0,0 [dB]
d	EIRP-Equivalent isotropically radiated power (a+b-c)	39,8	19,0 [dBm]
Receiver Gain & Losses			
e1	TX antenna diversity gain	0,0	0,0 [dBi]
e	RX antenna gain	-1,0	16,0 [dBi]
f1	RX connectors, combiners & jumpers loss	0,0	0,5 [dB]
f2	RX cable loss	0,0	0,0 [dB]
f	RX total losses	0,0	0,5 [dB]
g	RX Total Gain & Losses (e-f)		
Receiver			
h1	Thermal noise density	-174,0	-174,0 [dBm/Hz]
h	Thermal noise per RB (h1+10*log(12*15000))	-121,4	-121,4 [dBm]
i	RX noise figure	7,0	2,5 [dB]
j	RX Noise Floor per RB (h+i)	-114,4	-118,9 [dB]
k1	SIRmin (linear)	0,5	0,5 #
k2	Target cell load (linear)	0,7	0,5 #
k	IM-Interference margin	3,0	3,0 [dB]
l1	VoLTE Gain Features	0,0	3,0 [dB]
l	SINR	-6,0	-4,3 [dB]
m	RX Sensitivity per RB (j+k)	-120,4	-123,2 [dBm]
Margins			
n	Body Loss (UE side) margin	3,0	3,0 [dB]
o1	Shadow standard deviation	10,0	10,0 [dB]
o2	VoLTE edge reliability	95	95 %
o	Shadow (slow) or Log-Normal Fading margin (LNF)	16,4	16,4 [dB]
p	Building Penetration margin	15,0	15,0 [dB]
q	Total Margins (m+n+o+p)	37,4	37,4 [dB]
Path Loss & Cell Radius			
r	MAPL- Maximum Allowable Path Loss (d-l-q+e-f)	121,8	120,3 [dB]
s	Cell Radius		[m]

Total DL PRB	75	
BS tx Antennas	2	
UL tx Antennas	1	
DL Path Gain	0	
UL Path Gain	0	
DL SINR	-6,0	
UL SINR	-4,3	
DL MAC Overhead	20,41%	
UL MAC Overhead	25,51%	

RESULTS		
	Downlink	Uplink
EIRP/RB [dBm]	39,8	19,0
Sensitivity/RB [dBm]	-120,4	-123,2
MAPL Street [dB]	136,8	135,3
MAPL+Indoor [dB]	121,8	120,3
Cell Radius [m]		

Color Meaning	
	Must be filled
	Can be changed (not recommended)
	Do not change (automatic)

Figura 3.1: Plantilla Excel generada con diseño de Link Budget VoLTE

3.2.1. Simplificaciones consideradas

Se considerarán las siguientes simplificaciones en el diseño del *link budget* de VoLTE.

1. **Morfología del Terreno:** La morfología del terreno establece en qué tipo de terreno se encuentra la red a ser estudiada. Esta puede ser **Densa Urbana, Urbana, Sub-Urbana y Rural**. Los distintos tipos de morfología afectarán parámetros importantes del *link budget*, tales como los márgenes de penetración *indoor*, la desviación estándar del *Slow Fading Margin*, y la interferencia.

La ciudad de Santiago de Chile es una ciudad con distintos tipos de morfologías de terreno. Existen sectores de ésta con alta densidad de edificios, delimitando sectores Denso Urbanos o Urbanos (por ejemplo Santiago Centro), como también existen sectores con amplios terrenos que carecen de construcciones, los que corresponden a morfologías Sub-Urbanas o Rurales (por ejemplo las zonas periféricas de la ciudad).

Para el diseño de *link budget* de VoLTE se asumirá que la ciudad de Santiago es, en forma completa, una zona **Densa Urbana**. Este es el peor caso que se pueda tomar pues posee los márgenes más estrictos, además de tener un mayor impacto sobre la interferencia generada. Lo anterior permitirá, en trabajos futuros, relajar los márgenes tomados cuando se considere exclusivamente zonas de menor densidad urbana.

2. **Target Cell Load:** Bajo una operación común, cada celda de la red tendrá cierto uso de los recursos disponibles, siendo la carga instantánea de la celda el porcentaje de recursos utilizados sobre el total de los recursos disponibles de la celda. Del mismo modo, el *Target Cell Load* es la carga objetivo promedio que se espera que tenga la celda, bajo una situación de operación rutinaria o bajo la hora cargada.

La carga objetivo de celda puede impactar (dependiendo del método utilizado) en el cálculo del *Interference Margin*, SINR, y valores de nivel de señal reportados por el UE como el RSRP y Reference Signal Received Quality (RSRQ).

Para el presente diseño de *link budget* de VoLTE se asumirá un **Target Cell Load del 70 % para el downlink y 50 % para el uplink**. Para situaciones de diseño, es común asumir una carga del 50 % [2], sin embargo se ha considerado una carga mayor para el enlace de bajada para considerar la mayor demanda de descarga de datos por parte de los usuarios de redes celulares.

3. **SIRmin:** El Signal Interference Ratio (SIR) es la relación señal a interferencia (S/I). En LTE no existe interferencia interna en las celdas, sino que esta se debe en su mayoría a otras celdas cuya cobertura se solapa con la celda actual y utilizan frecuencias comunes. El SIRmin es el mínimo valor requerido por el aparato receptor para poder decodificar correctamente los paquetes recibidos.

Para el presente diseño de *link budget* de VoLTE se asumirá un **SIRmin de -3 dB** [2], lo que equivale a que el máximo nivel de potencia de interferencia puede llegar al doble de la potencia de la señal.

3.2.2. nPRB

Número de PRBs Asignados (nPRB) es la cantidad de PRBs distribuidos dinámicamente por el *scheduler* como recursos para el enlace ascendente o descendente de un usuario conectado a la red, considerando las peores condiciones de radio posibles, lo que se traduce en que el usuario se encuentre justo en el borde del alcance de la celda. Este valor está acotado superiormente por la cantidad de PRBs disponibles en la banda, e inferiormente por el dimensionamiento de la llamada, del cual se obtiene que se requiere de al menos 3 PRBs para transmitir un paquete de una llamada VoLTE.

Para el diseño del *link budget*, el número de PRBs asignados es un parámetro de libre elección, el cual varía dinámicamente con la asignación del *scheduler* entre un límite inferior y uno superior. Sin embargo, es necesario realizar los cálculos en torno a un valor fijo, el cual debe ser el valor utilizado en el borde de celda. En la literatura este valor comúnmente varía entre 2 PRBs y 3 PRBs, según el dimensionamiento calculado. Este valor impactará en la cantidad de llamadas VoLTE que se puedan realizar, y en la cantidad de recursos disponibles utilizados.

Para el enlace ascendente, tomando en consideración el tamaño del paquete VoLTE calculado en 3.1.3, y que se tendrá condiciones de borde de celda (se asume modulación QPSK), **el valor selecto es de 3 PRBs para *uplink***. Este valor coincide con el valor máximo a utilizar con TTI Bundling. En tanto que para *downlink* se utilizará valores de literatura y recomendados por el 3GPP para simulaciones, además de ser utilizados por el *vendor* actual y el consultor de VoLTE en sus *link budgets* para VoLTE, de forma tal que se podrá realizar comparaciones de forma más efectiva entre ellos. De ésta forma, **el valor selecto en el enlace descendente es de 10 PRBs**.

La tabla 3.6 resume los rangos de valores factibles para ambas bandas de frecuencias. Se considera en ella un límite inferior de 2 PRBs para el enlace ascendente, esto no es una contradicción al dimensionamiento realizado en 3.1.3, sino que pretende contemplar los dimensionamientos más optimistas que utilizan 2 PRBs para diseño y simulaciones, y un límite superior de 3 PRBs cuando el *feature* TTI Bundling se encuentra activo, dadas las limitaciones que el propio *feature* posee.

nPRB		2600		700	
		Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
Range without TTI B.	#	2-100	2-100	2-75	2-75
Range with TTI B.	#	2-100	2-3	2-75	2-3
nPRB selected	#	10	3	10	3

Tabla 3.6: nPRB asignados

3.2.3. Total Tx Power per PRB

El *Total Tx Power per PRB* es la potencia total irradiada por la antena emisora por cada PRB. En su cálculo influye principalmente la potencia del *hardware* utilizado, medido en Watts [W], y la cantidad de PRBs asignados. La potencia total de la antena es llevada a escala logarítmica (con unidades en [dBm]), y luego es dividida por la cantidad total de PRBs utilizados en el enlace correspondiente (*uplink* y *downlink*). La ecuación utilizada es:

$$Total\ Tx\ Power = 10 * (\log_{10}(1000 * Pw_{tx}) - \log_{10}(nPRB)) \quad (3.1)$$

Con Pw la potencia del transmisor en Watts y $nPRB$ el número de PRBs utilizados en el enlace, calculado en 3.2.2.

Para este cálculo se utiliza los datos del documento de antenas utilizadas por Entel para 2600 y 700 MHz, documento facilitado por el vendor actual [65]. A partir de la información entregada por Entel, se considera una potencia de 60 [W] para las antenas en la banda de 2600 MHz, en tanto que en la banda de 700 MHz se considera una potencia de 40 [W].

Tomando en consideración las características MIMO utilizadas, en la banda de 2600 MHz se utilizan arreglos de antenas de 2x4, es decir, dos antenas emisoras y cuatro antenas receptoras, y en la banda de 700 MHz arreglos de 2x2, es decir, dos antenas emisoras y dos antenas receptoras. Además, se considera que los aparatos móviles (UE) utilizan arreglos 1x2, es decir, una antena emisora y dos receptoras. Lo anterior se traduce en que existan dos trayectorias de antenas para *downlink* y una trayectoria de antena para el *uplink*, independiente de la banda utilizada.

La división de energía por PRB se debe realizar sobre todo el espectro, por lo que se utilizan los valores de la tabla 2.4, es decir, 100 PRBs en bajada para la banda 2600 y 75 PRBs en bajada para la banda 700. En cuanto al *uplink*, el valor de la potencia es dividido en la cantidad total de PRBs utilizados en el peor escenario posible, esto es, en el borde de celda. Nuevamente, en base a lo calculado en 3.1.3, se utilizarán 3 PRBs.

La tabla 3.7 resume los valores de parámetros utilizados y el valor calculado de potencia transmitida por PRB.

		2600		700	
TX Power per PRB		Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
nPRB	#	100	3	75	3
Antenna Paths	#	2	1	2	1
Tx power	[W]	60	0.2	40	0.2
Tx power	[dBm]	47.8	23.0	46.0	23.0
Tx power per antenna	[dBm]	44.8	23.0	43.0	23.0
Tx Power per PRB	[dBm]	24.8	18.2	24.3	18.2

Tabla 3.7: Potencia Transmisor por PRB

3.2.4. Antenna Gain

El valor *Antenna Gain*, Ganancia de Antena en español, corresponde a una ganancia intrínseca que poseen las antenas no isotrópicas al concentrar lo irradiado en lóbulos más pequeños. Este valor es comúnmente medido en decibeles de ganancia sobre un radiador isotrópico (dBi) y se calcula tanto para la antena emisora como para la antena receptora.

Para el caso de las antenas de las radio bases (eNB), los valores son obtenidos directamente del documento de antenas provisto por el *vendor* actual [65], obteniendo 18 [dBi] de ganancia para la banda de 2600 MHz (antena activa) y 16 [dBi] de ganancia para la banda de 700 MHz (antena pasiva). Por otra parte, dado que existe una gama muy amplia de dispositivos celulares, se adopta el estándar 3GPP para los terminales UE, el cual asigna una ganancia de 0 [dBi] para los terminales UE, pues estos utilizan antenas isotrópicas. Sin embargo, para la banda de 700 MHz se considerara una ganancia de -1 [dBi], pérdida que se debe a que las antenas de los celulares tienen bandas centrales en el rango de los 2000 MHz, por lo que se considera un escenario pesimista asociando una pérdida de 1 [dB] para bandas alejadas a la banda central.

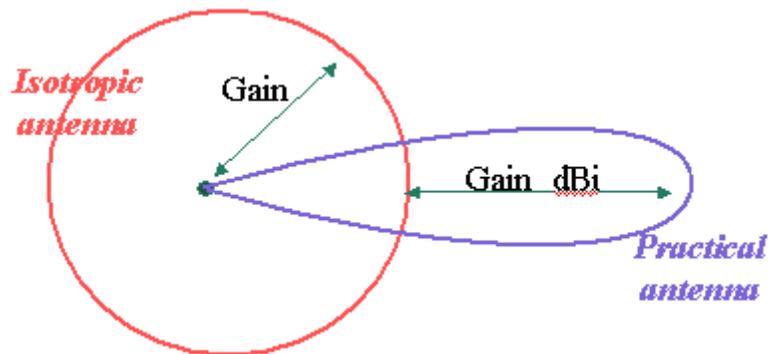


Figura 3.2: Ganancia de antenas no isotrópicas

A modo de ejemplificación, en la figura 3.2 se aprecia la irradiación de una antena isotrópica y la de una antena no isotrópica (direccional). La potencia no irradiada en el arco completo es utilizada para expandir la distancia de la antena direccional, siendo esta diferencia de distancia entre ambas la ganancia de antena.

Los valores de ganancia de antena son fijos, y por lo general no se toma en cuenta pequeñas variaciones que puedan tener respecto a su valor nominal. La tabla 3.8 resume los valores considerados para las bandas de 2600 y 700 MHz.

		2600		700	
Antenna Gain		Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
Antenna Gain	[dBi]	18	0	16	-1

Tabla 3.8: Ganancia de Antenas

3.2.5. Feeder Losses

Feeder Losses, o Pérdidas del Alimentador, corresponden a una agrupación de varias pérdidas que se generan antes de la transmisión de la señal por la antena base emisora, generadas entre la antena y su módulo controlador. Esto quiere decir que estas pérdidas sólo se presentan en el enlace descendente, no aplicando para los terminales móviles UE, donde las pérdidas son 0 [dB]. Entre las pérdidas presentes se cuentan: de cableado, combinadores, conectores y *jumpers*.

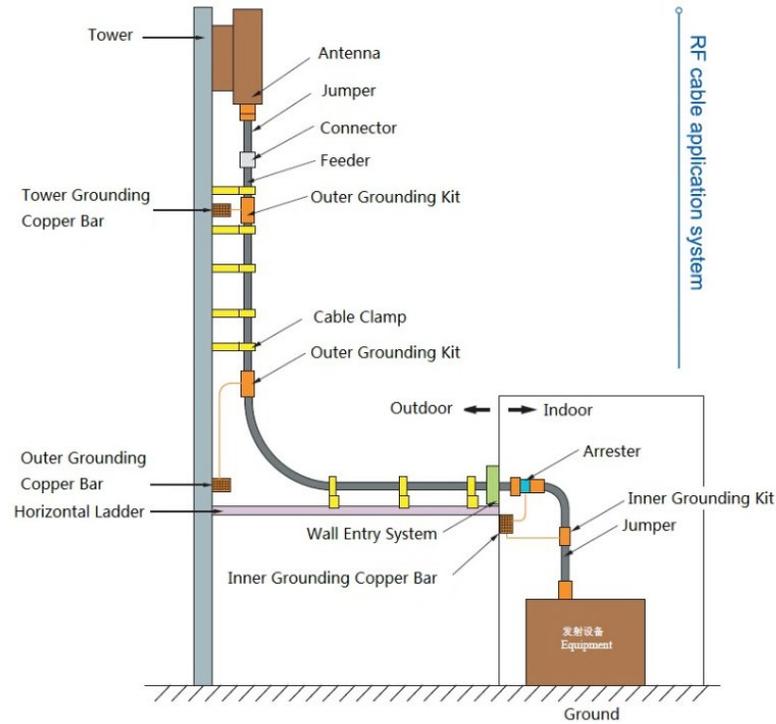


Figura 3.3: Componentes generales de un sistema de antena

Conforme a los datos extraídos de [1] y [66], las pérdidas de cableado varían según el diámetro del cable utilizado, de la frecuencia portadora, y de la cantidad de conectores, jumpers y módulos de combinación utilizados, sin embargo, dadas las características de las antenas utilizadas en las radio bases de Entel, se asume que las pérdidas son despreciables, con excepción del *jumper* exterior, el cual genera una pérdida aproximada de 0,5 [dB].

La tabla 3.9 resume las pérdidas del alimentador.

		2600		700	
Feeder Losses		Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
Feeder Losses	[dB]	0.5	0	0.5	0

Tabla 3.9: Pérdidas del Alimentador

3.2.6. EIRP

Effective Isotropic Radiated Power (EIRP), o Potencia Isotrópica Radiada Efectiva en español, corresponde a la suma o total parcial de los valores de las variables involucradas en lado del transmisor. Su cálculo considera la potencia total del transmisor por cada PRB (3.2.3), la ganancia de la antena emisora (3.2.4) y las pérdidas de la antena emisora (3.2.5), como se aprecia en la ecuación 3.2.

$$EIRP \equiv TX_{Power/PRB} + TX_{Antenna.Gain} - TX_{Losses} \quad (3.2)$$

A modo de ejemplo visual, en la figura 3.4 se visualiza a groso modo los componentes del lado del transmisor, y su correspondiente contribución al cálculo del EIRP.

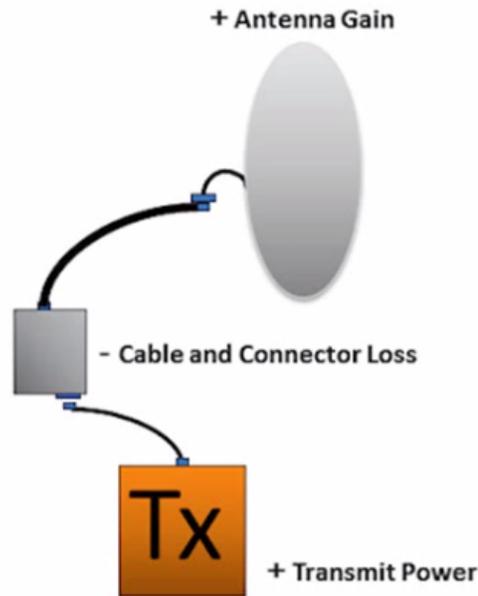


Figura 3.4: Representación gráfica del EIRP

La tabla 3.10 resume los valores de EIRP calculados para ambas bandas, considerando los valores de los puntos anteriores.

		2600		700	
EIRP		Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
Tx Power/PRB	[dBm]	24.8	18.2	24.3	18.2
Antenna Gain	[dBi]	18	0	16	-1
Feeder Losses	[dB]	0.5	0	0.5	0
EIRP	[dBm]	42.3	18.2	39.8	17.2

Tabla 3.10: Valores calculados para EIRP

3.2.7. Thermal Noise Density

La Densidad de Ruido Térmico es un tipo de ruido generado por la agitación térmica de los portadores de carga (electrones) en los circuitos eléctricos. Éste es independiente del voltaje aplicado, dependiendo únicamente de la temperatura en la que opera el dispositivo, como se aprecia en la ecuación 3.3, la cual está calculada en escala logarítmica.

$$\text{Thermal Noise Density per Hz} = 10 * \log_{10}(1000 * kT) \approx -174 \left[\frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} \right] \quad (3.3)$$

Donde k es la constante de Boltzmann ($k = 1.38065 * 10^{-23}$), y T corresponde a la temperatura de operación del artefacto eléctrico medido en grados kelvin. La temperatura, por lo general, se asume igual a la temperatura ambiente, es decir, 290 grados kelvin (aproximadamente 20 grados celsius). Operando, se obtiene que la densidad de ruido térmico es una constante y su valor es aproximadamente -174 dBm/Hz, tal como se calcula en [67].

Para efectos del cálculo del *LinkBudget*, el valor obtenido se debe multiplicar por el ancho de banda de un PRB, es decir, por 180 kHz. Con esto se obtiene un valor constante de -121.45 [dBm], el cual es independiente de la banda utilizada o del tipo de enlace (ascendente o descendente).

$$\text{Thermal Noise} = -174 + 10 * \log_{10}(180000) \approx -121,45 \quad (3.4)$$

La tabla 3.11 resume el valor constante utilizado para ambas bandas y ambos tipos de enlaces.

		2600		700	
Thermal Noise per PRB		Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
Thermal noise per PRB	[dBm]	-121.45	-121.45	-121.45	-121.45

Tabla 3.11: Ruido termal por PRB

3.2.8. Rx Noise Figure

El *Rx Noise Figure*, Figura de Ruido del Receptor, corresponde a la degradación de la relación señal a ruido (Signal Noise Ratio (SNR)) debido a los componentes internos del aparato receptor. La figura de ruido se calcula midiendo el SNR de entrada y el SNR de salida del aparato receptor. Este es un factor clave para medir el rendimiento del receptor, y no posee un valor estandarizado por el 3GPP, pues se suele medir de forma empírica.

Para el UE se suele utilizar valores entre 6 y 8 [dB], mientras que para el eNB se suele utilizar valores entre 2 y 3.5 [dB] [2, 68].

Para el presente diseño de *Link Budget*, se utilizarán los valores teóricos empleados en [68] y por el *vendor* actual en [62], quienes utilizan 7 [dB] para el *downlink* y 2.5 [dB] para el *uplink*, tanto para la banda de 2600 MHz como para la banda de 700 MHz. Cabe destacar que el valor de figura de ruido para el UE coincide con el valor utilizado por Entel para la red de datos (valor que no cambia para VoLTE), sin embargo se utilizan 2 [dB] para la figura de ruido del eNB. Pese a lo anterior, se utilizará 2.5 [dB] para el eNB como figura de ruido, pues es el valor sugerido por el creador de los equipos (*vendor* E) y este es un valor más conservador.

		2600		700	
Noise Figure		Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
Theoretical range values	[dB]	6-8	2-3.5	6-8	2-3.5
Noise Figure selected	[dB]	7	2.5	7	2.5

Tabla 3.12: Figura de Ruido

3.2.9. Noise Floor per PRB

El *Noise Floor*, Piso de Ruido, es un valor calculado a partir de la suma de la Densidad de Ruido Termal por PRB (3.2.7) y la Figura de Ruido (3.2.8). Sumando ambos valores obtenidos en los puntos anteriores se obtienen los valores para el piso de ruido de ambas bandas, y el tipo de enlace ascendente o descendente.

$$Noise\ Floor = Thermal\ Noise\ Density + Noise\ Figure\ [dBm] \quad (3.5)$$

		2600		700	
Thermal Floor per PRB		Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
Thermal Noise per PRB	[dBm]	-121.45	-121.45	-121.45	-121.45
Rx Noise Figure	[dB]	7	2.5	7	2.5
Noise Floor per PRB	[dBm]	-114.45	-118.95	-114.45	-118.95

Tabla 3.13: Piso de ruido por PRB

3.2.10. Antenna Diversity Gain

La ganancia de transmisión por diversidad está intrínsecamente relacionada a las características MIMO del enlace. La configuración básica, dada por el 3GPP [69], establece que existe una configuración de dos antenas transmisoras y dos antenas receptoras del lado de la radio base eNB (2T2R). En tanto que debe existir una antena transmisora y dos antenas receptoras del lado del terminal móvil UE (1T2R). Para otras configuraciones de antenas, el *vendor* actual provee las ganancias por diversidad de dichas configuraciones en el documento [62], de donde se extraen las tablas 3.14 y 3.15, las que resumen la ganancia de diversidad para los enlaces ascendentes y descendentes, respectivamente.

Antenna arrangement	Transmission mode	Gain [dB]
1x4	SIMO	3
1x8	SIMO	6

Tabla 3.14: Tabla 8 documento *vendor* actual - Ganancias de diversidad para Uplink

Antenna arrangement	Transmission mode	Gain [dB]
1x4	SIMO	3
2x2	TxDiv, OLSM, CLSM	0
2x4	TxDiv, OLSM, CLSM	3
4x2	TxDiv, OLSM, CLSM	0
4x4	TxDiv, OLSM, CLSM	3

Tabla 3.15: Tabla 9 documento *vendor* actual - Ganancias de diversidad para Downlink

En el presente estudio se considera las características MIMO de 2x2 en el *downlink* para ambas bandas, y 1x4 (en banda 2600) ó 1x2 (en banda 700) en el *uplink*. Estas características MIMO no poseen ganancia (0 [dBi]) según las tablas 3.14 y 3.15, con excepción del arreglo 1x4 en la banda de 2600 MHz para el enlace de subida, donde, según la tabla 3.14, se obtiene una ganancia de diversidad de 3 [dBi]. La tabla 3.16 resume los valores obtenidos para la diversidad de antena.

		2600		700	
Diversity Gain		Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
Antenna diversity gain	[dBi]	0	3	0	0

Tabla 3.16: Ganancias de Diversidad de Antena

3.2.11. VoLTE Gain Features

Como ya se había mencionado en el punto 2.5.6, existen *features* opcionales a la implementación de VoLTE, los que ayudan a mejorar la cobertura de éste. Los dos *features* principales son para la ganancia de cobertura son:

- TTI Bundling (sub-sección 2.5.6.3)
- Frequency Hopping (sub-sección 2.5.6.4)

En adelante, se considerará el *feature* ROHC y RLC UM Segmentation activos cuando esté habilitado TTI Bundling, y del mismo modo, se considerará activo TTI Bundling (y los *features* antes mencionados) cuando se active el *feature* *Frequency Hopping*.

Estos *features* son activados para las peores condiciones de señal, las cuales se dan en el borde de celda. En general, las ganancias de estos *features* son variables, dependiendo de la morfología del terreno (3.2.1), además de la forma en que el *vendor* realice la implementación de la característica, y de otras variables, tales como el *scheduler* utilizado. Es por esto que en la literatura existen diversos valores para estas características. En el caso de TTI Bundling, la ganancia esperada varía desde 1 [dB] hasta 5 [dB] [68], en tanto que no existe mayor información de la ganancia esperada para *frequency hopping*.

Debido a lo anterior, se decidió buscar estudios y simulaciones de ambos *features*, con el fin de determinar un valor para estos. El estudio de Han [70], aunque estuvo enfocado en la ganancia de capacidad, determinó que ganancias de entre 2.3 a 3 [dB] se logran con TTI Bundling *release* 8, en tanto que Susitaival [71], con un estudio acabado sobre la cobertura de TTI Bundling *release* 8, determina que una ganancia de 4 [dB] es lo esperado al considerar errores de Acknowledgement (ACK)/Negative Acknowledgement (NACK). En tanto que para *frequency hopping*, se encontró que Khan [72] realizó un estudio de cobertura para *frequency hopping* en redes LTE, determinando que ganancias entre 0.3 y 0.7 [dB] son esperables.

Finalmente, tomando en consideración los estudios antes mencionados, se considerará 3 [dB] de ganancia para el conjunto *ROHC + RLC + TTI Bundling* y 4 [dB] para el set completo de *features* (*ROHC + RLC + TTI Bundling + Frequency Hopping*). Cabe destacar que estudios posteriores, como el presentado en [69], establece que las mejoras propuestas para TTI Bundling a partir del *release* 10 (llamadas *TTI Bundling Enhancement*) logran ganancias entre 0.5 y 1.7 [dB] sobre las ganancias de TTI Bundling *release* 8. Por último, las ganancias de *features* no son incluidas directamente en *link budget*, sino que son sumadas al SINR objetivo.

		2600		700	
VoLTE Features		Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
RLC+TTI B.	[dB]	-	3	-	3
RLC+TTI B.+Freq. Hopping	[dB]	-	4	-	4

Tabla 3.17: Ganancias por *features* opcionales VoLTE

3.2.12. Target SINR

El Signal to Interference-plus-Noise Ratio (SINR) es el valor objetivo deseado de la relación entre la potencia de la señal recibida y la potencia del ruido sumada a la potencia de las interferencias. Este parámetro depende de diversos factores, tales como la modulación utilizada (índice MCS), característica MIMO utilizada, *throughput* objetivo en el borde de celda (de existir), niveles de ruido, niveles de interferencia, entre otros. Lo anterior hace que este parámetro sea difícil de calcular, no existiendo valores establecidos. En general, el SINR objetivo es obtenido mediante tablas que relacionan velocidades deseadas en *downlink* y en *uplink* en el borde de celda, las cuales son obtenidas de forma empírica (tabla A-2 del documento TR 36.942 del 3GPP [73]). Sin embargo, para *link budgets* de VoLTE no se puede establecer una relación directa entre la velocidad y el SINR objetivo, pues distintas implementaciones de distintos *vendors* pueden generar velocidades requeridas distintas. Por último, la principal dificultad del cálculo del SINR radica en establecer un valor para la interferencia, la cual depende de las celdas aledañas y de la morfología del lugar. La ecuación 3.6 muestra la forma lineal del SINR.

$$SINR \equiv \frac{S}{N + I} \quad (3.6)$$

Con S: Potencia de la señal recibida en [W], I: Potencia de la interferencia en [W], y N: Potencia del ruido en [W].

O de la forma logarítmica:

$$SINR_{dB} \equiv 10 * \log_{10} \left(\frac{P_S}{P_N + P_I} \right) \quad (3.7)$$

P_S : Potencia Recibida
 P_I : Potencia Interferencias
 P_N : Potencia Ruido

Para estimar el SINR objetivo se puede adoptar uno de los siguientes métodos:

1. Deduciendo los valores medidos por el terminal UE: RSRP, Received Signal Strength Indicator (RSSI), y RSRQ, determinar el valor medido SINR en el lado UE [74].

Lo anterior se logra calculando el valor RSRQ según su definición, como se aprecia en la ecuación 3.8.

$$RSRQ = N_{PRB} * \frac{RSRP}{RSSI} \quad (3.8)$$

Luego, es posible determinar el valor del SINR según la ecuación 3.9.

$$SINR = \frac{1}{\frac{1}{12 * RSRQ} - x} \quad (3.9)$$

Donde X representa el factor de actividad, siendo $x=RE/RB$, es decir, los *resource elements* utilizados por PRB. Sin embargo el factor de actividad es muy variable, por lo que un SINR estimado de ésta forma no es generalizable.

2. A partir del teorema de capacidad de Shannon, se puede invertir la ecuación para obtener una cota del valor de SINR objetivo [2]. Esta forma es comúnmente mejorada por medio de dos constantes que ayudan a acercar la curva generada a la curva real de la red. La ecuación 3.10 muestra el Teorema de Capacidad de Canal de Shannon con las constantes de ajuste α y β incorporadas.

$$C = \beta * B * \log_1(1 + \alpha * SINR) \quad (3.10)$$

Con C: Capacidad (bit/s), B: Ancho de banda (Hz), y α, β : Constantes de ajuste.

El principal problema con este método radica en la correcta elección de los parámetros α y β , los que en general deben ser calculados para cada red en particular.

3. Se puede relacionar el valor de SINR con una velocidad (*throughput*) de subida y de bajada en el borde de celda. Esto se hace mediante tablas de valores medidos empíricamente. Para este efecto, se utiliza el documento 3GPP TS 36.942 [73], el cual contiene una tabla para relacionar valores de tasas de subida y bajada con valores de SINR medidos.

Este método es utilizado actualmente por Entel para el cálculo de SINR en la red de datos, y fue empleado por el consultor VoLTE para sus cálculos de *link budget* de VoLTE, sin embargo, como se mencionó al comienzo de la sub-sección, no se puede determinar una velocidad de VoLTE para el borde de celda dadas las diferencias de implementación de los distintos *vendors*. Además, de tomarse el valor calculado en 3.1.3 (17,6 kbps para el *codec* AMR-WB 12,65), el valor de *throughput* requerido sería demasiado bajo, por lo que escaparía de la tabla, obteniendo un SINR objetivo igual o inferior a -10 [dB], valor no factible.

4. Mediante simulaciones de la red, es posible calcular un valor de interferencia medio, y el valor simulado de ruido. Con ambos, es posible determinar el valor del SINR objetivo por medio de su definición, es decir, por medio de la ecuación 3.6. Este método a veces es utilizado en *papers*, pero comúnmente es empleado bajo redes simuladas con características idealistas, las que carecen de factores de redes reales.
5. A partir de la definición de SINR, es posible utilizar tablas de SNR y, con valores dados de SIRmin y *cell load* determinar un valor de SINR objetivo. Esto se realiza mediante la aproximación de la ecuación 3.11.

$$SINR = \frac{S}{I + N} = \frac{1}{\frac{I}{S} + \frac{N}{S}} \approx \frac{1}{\frac{\eta}{SIR_{min}} + \frac{1}{SNR}} \quad (3.11)$$

Donde SIRmin es el ratio $S/(I*\eta)$, y η es el *cell load average*, es decir, la carga de celda

promedio (3.2.1).

6. El último método, recomendado en la literatura especializada, consiste en emplear curvas SINR entregadas por los *vendors* de los equipos LTE.

Según la tabla 15.4 de [67] (tabla 3.18), valores esperados para el enlace ascendente rondan los -4,7 [dB] sin TTI Bundling y los -7,7 [dB] con TTI Bundling, en tanto que la tabla 8.2.5.1-1 del documento TS 36.104 del 3GPP [9] (tabla 3.19) sugiere un valor cercano a los -8,4 [dB] para la banda de 2600 MHz y -4,6 [dB] para la banda de 700 MHz con TTI Bundling activo.

Table 15.4 Required SINR for VoIP in TDD and FDD with and without TTI bundling. UE transmission bandwidth assumed to be 360 kHz (2 PRB)

System	TDD (3DL/2UL or 2DL/3UL)		FDD	
Bundling enabled	No	Yes	No	Yes
Number of transmissions	5	8	7	14
Required SINR	-3.3 dB	-5.3 dB	-4.7 dB	-7.7 dB

Tabla 3.18: UL SINR objetivo sin y con TTI Bundling - Libro

Number of TX antennas	Number of RX antennas	Cyclic Prefix	Propagation conditions and correlation matrix (Annex B)	Channel Bandwidth / SNR [dB]					
				1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
1	2	Normal	EVA 5 Low	-4.7	-4.7	-4.7	-4.7	-4.6	-4.6
			ETU 300* Low	-7.9	-7.9	-8.0	-7.9	-8.0	-7.9
	4		EVA 5 Low	-8.4	-8.3	-8.3	-8.3	-8.4	-8.4
			ETU 300* Low	-10.3	-10.3	-10.3	-10.4	-10.3	-10.3
	8		EVA 5 Low	-11.4	-11.3	-11.4	-11.4	-11.3	-11.4
			ETU 300* Low	-12.5	-12.4	-12.5	-12.4	-12.4	-12.5

Tabla 3.19: UL SINR objetivo con TTI Bundling - 3GPP

Dado que la utilización del método 3 se ha descartado por escapar a los valores de la tabla, se utilizarán los métodos 5 y 6 para calcular el SINR objetivo, y se utilizará el mayor valor obtenido (SINR objetivo más demandante). Para el método 6, el *vendor* E, en su documentos *VoIP Dimensioning* [62], entrega tablas de valores de SINR para VoLTE dependiendo del *codec* AMR de audio seleccionado. Un extracto de las tablas del *vendor* se muestra en las tablas 3.20 y 3.21.

Cabe destacar que se ha obtenido el valor SINR asociado a la utilización del *feature* TTI Bundling, pues para el diseño de *link budget* se considerará TTI Bundling activo. Se asume que el SINR objetivo sin TTI Bundling será 3 [dB] mayor.

En cuanto al método número 5, en el *paper* de Salo [75] se describen varias formas y aproximaciones para calcular SINR bajo condiciones con y sin interferencia. A partir de la ecuación 3.11, y tomando los valores $SIR_{min} = 0,5$, y $\eta_{UL} = 0,5$ (extraídos de 3.2.1), se requerirá únicamente un valor de SNR para obtener el SINR.

De la tabla 8.2.1.1-6 del documento TS 36.104 del 3GPP [9], se obtiene un valor de SNR de -6,8 [dB] para la banda de 2600 MHz (antena 1x4, *cyclic prefix normal*, EPA 5Hz) y -0,8 [dB]

para la banda de 700 MHz (antena 1x2, *cyclic prefix normal*, EPA 5Hz). Al valor -6,8 [dB] se le descuenta (suma) 3 [dB], dado que dicho valor ya considera la ganancia de diversidad de antena, la cual es sumada de forma independiente en el *link budget*, quedando -3,8 [dB].

Para el SNR de -3,8 [dB] (banda 2600 MHz), se calcula un SINRdb objetivo de -5,31 [dB], en tanto que para el SNR de -0.8 [dB] (banda 700 MHz), se calcula un SINRdb objetivo de -3,43 [dB]. Estos valores no consideran la ganancia de TTI Bundling, por lo que se les resta 3 [dB], quedando un SINRdb objetivo de -8,31 [dB] para la banda de 2600 MHz y un SINRdb objetivo de -6,43 [dB] para la banda de 700 MHz.

Los valores anteriormente calculados superan (más negativos) a los valores de tabla entregados por el *vendor*, por ende se seleccionan los valores del *vendor* actual como valores objetivos, por ser SINR objetivos más demandantes que los calculados por medio del método 5 o valores consultados en literatura. **Si se desea considerar un escenario pesimista, se puede incrementar los valores de SINR en 3 [dB]**, tanto para el enlace de subida como el enlace de bajada. Esto equivaldría a considerar la mitad de la razón SINR, es decir, considerar sólo la mitad de la potencia de la señal, ó considerar el doble de la potencia de ruido más interferencia. Este rango se utilizará debido a que no se especifican en los documentos del *Vendor* existente cómo se obtuvieron los valores de SINR objetivos, y se espera que estos podrían ser más demandantes en los entornos de una ciudad urbana como lo es Santiago.

Uplink			
Codec	SINR [dB]		
	EPA5	EVA70	ETU300
AMR-WB 23.85 kbps	-6.4	-6.9	-5.9
AMR-WB 12.65 kbps	-7.4	-9.3	-8.5
AMR-WB 8.85 kbps	-7.5	-9.7	-9.2
AMR-WB 6.60 kbps	-7.6	-9.7	-9.3

Tabla 3.20: Extracto tabla *vendor* actual - Uplink SINR con TTI Bundling

VoIP Downlink	
Bands	SINR [dB]
2600 MHz	-6.0
700 MHz	-6.0

Tabla 3.21: Extracto tabla *vendor* actual - Downlink SINR

De ésta forma, se utilizará el valor de -6 (dB) para *downlink*, y -4.3 (dB) para *uplink* utilizando RLC y TTI Bundling, *features* de VoLTE. La tabla 3.22 resume los valores adoptados.

		2600		700	
SINR		Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
Target SINR	[dB]	-6.0	-4.3	-6.0	-4.3

Tabla 3.22: Resumen valores SINR

3.2.13. Interference Margin (IM)

En las redes 4G, dada las características de la modulación OFDM, no existe interferencias inter-celda. Sin embargo, celdas lejanas que operen con las mismas frecuencias pueden causar interferencias si su radio se solapa con el de la celda en cuestión. Para tomar en cuenta este fenómeno se puede establecer la siguiente ecuación para el enlace de bajada [2]:

$$IM = \frac{1}{1 - \eta \frac{SINR}{SIR_{min}}} \quad (3.12)$$

Con SIR la relación de señal versus interferencia, y η la carga objetivo de las celdas aledañas [2].

Es posible asumir una relación mínima SIR de 0.5 lineal (punto 3.2.1), es decir, recibir al menos el doble la señal original versus la suma de señales de interferencia, en cuanto a la carga de celda (γ), se puede utilizar una carga del 70 % para el enlace de bajada (valores superiores pueden ser adoptados para obtener buen funcionamiento incluso bajo celdas con alto tráfico). En tanto para el enlace de subida, no es posible utilizar la ecuación 3.12, pues la interferencia del lado del UE seguirá un modelo de probabilidad de mayor complejidad, debido a que no se puede prever la distribución de los usuarios y los componentes espaciales (edificaciones) de la red completa. Ello lleva a que en la literatura se adopte un valor conservador para el *uplink*, considerando 3 [dB] para el margen de interferencia [2, 76].

La tabla 3.23 resume los datos calculados y adoptados para el valor de margen de interferencia en ambas bandas.

		2600		700	
Interference Margin		Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
Calculated IM	[dB]	1.9	-	1.9	-
Selected IM Value	[dB]	1.9	3.0	1.9	3.0

Tabla 3.23: Margen de Interferencia

Como se aprecia en la tabla 3.23, se obtuvo un valor calculado de 1.9 [dB] para el margen de interferencia en el enlace descendente.

Si se desea considerar un caso pesimista, se puede fijar el valor de IM en 3 [dB], tanto para el enlace de subida como el enlace de bajada.

3.2.14. Body Loss Margin

Las Pérdidas de Cuerpo es un margen que se genera para representar pérdidas asociadas al cuerpo de la persona que utiliza el UE. Las pérdidas de cuerpo, a veces mencionadas como pérdidas de cabeza, son las pérdidas asociadas al cuerpo humano.

Por lo general, durante una llamada telefónica, el usuario apega el dispositivo móvil a su oreja, por lo que es común que la línea vista hacia la radio base se vea interrumpida por el cráneo del usuario, causando una degradación de la señal en la transmisión y recepción. La degradación varía respecto a la frecuencia de la señal portadora, sin embargo la literatura establece que es recomendado utilizar un margen de pérdidas de 3 [dB] para llamadas en forma genérica [2, 56].

A falta de estudios concluyentes respecto a las pérdidas de cuerpo, se utilizará el valor de literatura, como se aprecia en la tabla 3.24.

		2600		700	
Body Loss		Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
Body loss margin	[dB]	3	3	3	3

Tabla 3.24: Pérdidas de cuerpo

3.2.15. Rx Sensitivity

La Sensibilidad en el receptor es un resultado parcial del *link budget*, y agrupa los elementos concernientes al receptor. Físicamente, la sensibilidad del receptor es el nivel mínimo de señal que le permite al aparato receptor ser capaz de demodular de forma correcta la señal recibida, permitiendo la comunicación. La sensibilidad corresponde a la suma del *Noise Floor*, diversidad de antena, valor objetivo *SINR*, el margen de interferencia (IM) y el margen de cuerpo, como se aprecia en la ecuación 3.13. La tabla 3.25 resume los valores obtenidos.

$$RX\ Sensitivity = Noise\ Floor + Antenna\ Diversity + SINR + IM + Body\ Loss \quad (3.13)$$

		2600		700	
RX Sensitivity		Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
Noise Floor	[dBm]	-114.45	-118.95	-114.45	-118.95
Antenna Diversity Gain	[dBi]	0	3	0	0
Target SINR	[dB]	-6	-4.3	-6	-4.3
Interference Margin	[dB]	1.9	3	1.9	3
Body Loss	[dB]	3	3	3	3
Sensitivity	[dBm]	-115.45	-120.25	-115.55	-117.25

Tabla 3.25: Sensibilidad del Receptor por PRB

3.2.16. Log-Normal Fading Margin (LNF)

El Log Normal Fading margin (LNF), también conocido como Margen de Desvanecimiento Lento (*Slow Fading Margin*), se calcula mediante el porcentaje de confiabilidad en el borde de la celda (*cell edge reliability*), el cual tiene un valor del 95 % para llamadas VoLTE. Se utiliza una desviación estándar teórica de 10 [dB], y luego se procede a calcular el LNF mediante la función normal inversa centrada en cero.

$$LNF = NORMINV (Reliability.\%, Standard.Deviation) \quad (3.14)$$

La tabla 3.26 resume los valores calculados para los distintos tipos de modelos de zonas geográficas: Denso-Urbano, Urbano y Rural. Los modelos geográficos son utilizados por los modelos de propagación para determinar los radio de cobertura, los cuales se adjuntan en el Anexo A.

	LNF Std. Dev.	VoLTE edge Reliability	LNF
Dense Urban	10	95 %	16.4
(Sub)Urban	8	95 %	13.2
Rural	6	95 %	9.9

Tabla 3.26: Margen de penetración de desvanecimiento

Para los siguientes puntos, se considerará que Santiago corresponde a una geolocalización del tipo denso-urbana, omitiendo los cálculos y valores para los otros dos tipos.

3.2.17. Building Penetration Margin

El Margen de Penetración de Edificios es una tolerancia generada para permitir que la potencia de la señal emisora sea tal que pueda atravesar la muralla externa de las construcciones, para que los habitantes tengan señal al interior de dichas edificaciones. Este margen normalmente es medido de forma empírica, y varía dependiendo de la morfología del entorno (rural, urbano y denso-urbano). Distintos tipos de materiales de construcción, y el grosor de las paredes de éstas, hacen que la penetración en viviendas sea incierta, y contemple un amplio rango de valores. Es por esto que se ha tomado valores conservadores para la penetración, a partir de lo expuesto en [68]

Penetration Margin		Indoor Penetration 2600 Mhz	Indoor Penetration 700 Mhz
Dense Urban	[dB]	24	15
(Sub)Urban	[dB]	19	12
Rural	[dB]	11	6

Tabla 3.27: Margen de penetración de edificaciones

3.2.18. Total Margins

El margen total es la suma de los otros márgenes antes calculados. Para la confección del presente *link budget* se consideran dos márgenes: desvanecimiento lento y penetración de edificios.

$$Total\ Margins \equiv LNF + Penetration\ Margin \quad (3.15)$$

		2600		700	
Total Margins		Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
Dense Urban	[dB]	40.4	40.4	31.4	31.4
(Sub)Urban	[dB]	32.2	32.2	25.2	25.2
Rural	[dB]	20.9	20.9	15.9	15.9

Tabla 3.28: Margen total

3.2.19. MAPL - Maximum Allowable Path Loss

El Maximum Allowable Path Loss (MAPL) es el valor de salida final del *link budget*. Este valor entrega las pérdidas máximas de trayecto (entre emisor y receptor) para que exista un nivel aceptable de señal, tal que exista comunicación.

El cálculo del MAPL es:

$$MAPL \equiv EIRP + Rx\ Antenna\ Gain - RX\ Losses - Sensitivity - Margins \quad (3.16)$$

		2600		700	
Maximum Allowable Path Loss		Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
EIRP	[dBm]	42.3	18.2	39.8	17.2
Rx Antenna Gain	[dBi]	0	18	-1	18
Rx Losses (Feeder Losses)	[dB]	0	0.5	0	0.5
Rx Sensitivity	[dBm]	-115.55	-120.25	-115.55	-117.25
Margins	[dB]	40.4	40.4	31.4	31.4
MAPL	[dB]	117.45	115.55	119.95	115.55

Tabla 3.29: Máxima pérdida de trayecto

3.3. Resumen y Comparación de Link Budgets VoLTE

En la presente sección se realiza un resumen de los valores obtenidos en la sección anterior, luego se calcula el valor de corte RSRP a ser utilizado en simulaciones del capítulo 4, y se finaliza comparando los diseños de distintos *link budgets*.

3.3.1. Tabla Resumen de diseño Link Budget

En la tabla 3.30 se puede apreciar el resumen de los valores obtenidos para EIRP, *Sensitivity* y MAPL, en el diseño de *link budget* para VoLTE. A partir del valor de MAPL se obtendrá el valor de RSRP que será utilizado como valor de corte en las simulaciones del capítulo 4.

		2600		700	
Resume		Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
EIRP	[dBm]	42.3	18.2	39.8	17.2
Rx Sensitivity	[dBm]	-115.55	-120.25	-115.55	-117.25
MAPL (no margins)	[dB]	157,85	155.95	154.35	149.95
Margins	[dB]	40.4	40.4	31.4	31.4
MAPL (with margins)	[dB]	117.45	115.55	119.95	115.55

Tabla 3.30: Resumen de diseño Link Budget VoLTE

3.3.2. Cálculo de RSRP para simulaciones

El programa de simulación utilizado por Entel, Menthum Planet, requiere de un valor de RSRP de corte. Dicho valor representa en qué nivel de señal (RSRP) la simulación establece el límite de cobertura de la celda. Para obtener el valor de RSRP de corte se ha tomado el modelo utilizado por Entel en su *link budget* de datos, para ser consistente con el valor calculado.

Para los *link budgets* calculados, en base a 10 PRBs de bajada, con *cyclic prefix* normal (20,41 % de Overhead), se obtuvo el valor fijo de 13,4473 [dBm] de potencia para la banda de 700 MHz, y 13,9979 [dBm] de potencia para la banda de 2600 MHz . Luego, según la ecuación 3.17, se procedió a sumar las ganancias de antena y a restarle el menor MAPL sin margen (menor entre el enlace descendente y ascendente), a cada uno de los *link budgets* comparados. El resultado de éste cálculo se puede apreciar al final de las tablas 3.33 y 3.34.

En la tabla 3.31 se aprecia los valores RSRP calculados para VoLTE, incluyendo el caso pesimista. Se debe notar que para el cálculo RSRP, se toma el menor MAPL entre el enlace ascendente y descendente. Para las simulaciones del capítulo 4 se utilizará el RSRP de corte que incorpora el LNF, con el objetivo de visualizar el efecto que tiene un mayor desvanecimiento al considerar un mayor porcentaje de confiabilidad en el borde de celda (95 % para VoLTE).

Memoria	2600 MHz		2600 PESIMISTA		700 MHz		700 PESIMISTA	
	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
EIRP	42,3	18,2	42,3	18,2	39,8	17,2	39,8	17,2
SENSITIVITY	-115,55	-120,25	-111,45	-117,25	-115,55	-117,25	-111,45	-114,25
MAPL (no margins)	157,85	155,95	153,75	152,95	154,35	149,95	150,25	146,95
RSRP Treshold	-123,95		-120,95		-120,50		-117,50	
LNF Margin	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4
Penetration Margin	24,0	24,0	24,0	24,0	15,0	15,0	15,0	15,0
MAPL (with margins)	117,45	115,55	113,35	112,55	119,95	115,55	115,85	112,55
RSRP Treshold (fading)	-107,55		-104,55		-104,10		-101,10	
RSRP Treshold (margins)	-83,55		-80,55		-89,10		-86,10	

Tabla 3.31: Resumen Link Budget y Valores RSRP de Corte

Además, en la tabla 3.32, se incorpora los valores de corte RSRP de la red de datos de Entel.

		VoLTE 2600		Entel BE 2600		VoLTE 700		Entel BE 700	
		Downlink	Uplink	Downlink	Uplink	Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
MAPL	[dBm]	157.85	155.95	155.77	155.77	154.35	149.95	150.99	150.99
RSRP TRESHOLD	[dBm]	-123.95		-123.77		-120.50		-121.54	
LNF	[dB]	16.4	16.4	12.82	12.82	16.4	16.4	12.82	12.82
RSRP with Fading	[dBm]	-107.55		-110.95		-104.10		-108.72	
Penetration Margin	[dB]	24	24	20	20	15	15	16	16
RSRP with Margins	[dBm]	-83.55		-90.95		-89.10		-92.72	

Tabla 3.32: Resumen valores RSRP VoLTE y RSRP Best Effort Entel

3.3.3. Comparación Diseño Link Budget VoLTE

En esta sub-sección se comparan los distintos *link budgets* generados:

- **Link Budget Best Effort (datos) de Entel:** Corresponde al *link budget* real utilizado por el área de diseño de Entel para la red de datos en Santiago.

- **Link Budget VoLTE (ajustado) de Entel:** Corresponde al *link budget* de datos de Entel ajustado por el alumno memorista con datos de VoLTE. Esto se ha realizado meramente para obtener un punto de comparación.
- **Link Budget VoLTE Vendor E:** Corresponde al *link budget* de VoLTE entregado por el *vendor* actualE en su documento [62] a Entel. Sólo se realizó para la banda de 2600 MHz.
- **Link Budget Consultor VoLTE :** Corresponde al *link budget* de VoLTE diseñado por la empresa consultora de VoLTE contratada por Entel, considerando los datos de la red de Entel.
- **Link Budget VoLTE Memoria:** Corresponde al *link budget* de VoLTE diseñado durante el presente capítulo por el alumno memorista, para la red de Entel, considerando los datos de ésta.

En la tabla 3.33 se puede visualizar el resumen de los datos utilizados por en los distintos *link budgets* de la banda 2600 MHz.

A fin de poder comparar los distintos *link budgets*, es necesario realizar las siguientes observaciones:

- Los *link budgets* de Entel no están calculados en base a un PRB, sino que están calculados en base a cada trayecto de antena (*Antenna Branch*). Ello causa que no se pueda comprar de forma directa valores de potencia de salida del emisor, EIRP, piso de ruido termal (*Thermal Noise Floor*) y sensibilidad del receptor. Sin embargo, los resultados finales, refiérase al MAPL y RSRP de corte, si pueden ser comparados de forma directa.
- Para el *link budget* VoLTE de Entel ajustado a partir del *link budget* de datos de Entel, se utilizó una velocidad objetivo de borde de celda de 64 kbps, velocidad muy superior a los 17,6 kbps calculados en 3.1.3. Además se utilizó los datos que sugería la misma plantilla para VoLTE, como por ejemplo 2 [dB] de pérdida de cuerpo para el enlace de bajada, en vez de 3 [dB]. Por último, y para poder comparar con los *link budgets* del *vendor* actual y del consultor VoLTE, se utilizó 10 PRB para *edownlink* y 2 PRB para *uplink*.

A partir de la tabla 3.33, se destaca:

1. El *link budget* generado (Memoria) es el único que contempla 3 PRB en el enlace ascendente, en vez de 2. Esto afecta a la potencia distribuida por PRB y por ende al valor de EIRP. Se enfatiza la necesidad de utilizar un *link budget* con 3 PRBs dado el dimensionamiento realizado en el punto 3.1.3.
2. La similitud del resultado del RSRP de corte, a ser utilizado en las simulaciones del

2600 Mhz	Unit	Entel BE		Entel Adjust*		Vendor E		Consultor Q		Memoria	
		DL	UP	DL	UP	DL	UL	DL	UL	DL	UL
<i>nPRB</i>	#	22	8	10	3	10	2	10	2	10	3
<i>TX maximum transmission power</i>	[dBm]	47,8	23	47,8	23	46,02	23	44,7	23	47,78	23
<i>TX output power per antenna</i>	[dBm]	38,21	23	34,79	23	-	23	-	-	44,8	23
TX Power per RB	[dBm]	-	-	-	-	26	20	27,71	20	24,8	18,2
TX Antenna Gain	[dBi]	18	0	18	0	18,5	0	18	-1	18	0
<i>TX connectors, combiners & jumpers</i>	[dB]	0,5	0	0,5	0	0	0	0,5	0	0,5	0
<i>TX cable loss</i>	[dB]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TX Total Losses	[dB]	0,5	0	0,5	0	0	0	0,5	0	0,5	0
EIRP	[dBm]	55,71	23	52,29	23	44,5	20	45,21	19	42,3	18,2
RX Antenna Gain	[dBi]	0	18	0	18	0	18,5	-1	18	0	18
RX Total Losses	[dB]	0	1	0	1	0	0	0	0,5	0	0,5
RX GAIN - LOSSES	[dB]	0	17	0	17	0	18,5	-1	17,5	0	17,5
RX Noise Figure	[dB]	7	2	7	2	7	2,5	7	3	7	2,5
RX Thermal Noise	[dBm]	-108,02	-112,42	-111,45	-116,68	-121,45	-121,45	-121,45	-121,45	-121,45	-121,45
<i>SIRmin (linear)</i>	#	-	-	-	-	-	-	-	0,5	0,5	0,5
<i>Target cell load (linear)</i>	%	78	78	90	90	-	-	70	50	70	50
IM-Interference margin	[dB]	0,5	1,5	0,5	1,5	8,6	2,6	3	3	1,9	3
Antenna diversity Gain	[dBi]	2	3	2	3	0	3	0	0	0	3
<i>VoLTE Gain Features</i>	[dB]	0	0	0	0	0	5,7	0	3	0	3
SINR	[dB]	2,47	-3,35	-9	-8,21	-6	-4,3	-2,5	1,5	-6	-4,3
Body Loss (UE side) margin	[dB]	0	0	2	3	3	3	2	2	3	3
SENSITIVITY	[dBm]	-100,05	-115,27	-112,95	-121,39	-108,9	-120,65	-111,95	-111,95	-115,55	-120,25
MAPL (without margins)	[dB]	155,76	155,77	165,24	161,39	153,35	159,15	156,16	148,45	157,85	155,95
RSRP TRESHOLD	[dBm]	-123,77		-129,39		-120,85		-116,45		-123,95	
<i>Shadow standard deviation</i>	[dB]	10	10	10	10	-	-	10	10	10	10
<i>VoLTE edge reliability</i>	%	90	90	90	90	-	-	95	95	95	95
Shadow margin (LNF)	[dB]	12,82	12,82	12,82	12,82	4,9	4,9	16,4	16,4	16,4	16,4
Building Penetration margin	[dB]	20	20	20	20	18	18	27	27	24	24
MARGINS	[dB]	32,82	32,82	32,82	32,82	22,90	22,90	43,40	43,40	40,40	40,40
MAPL (with margins)	[dB]	122,95	122,45	132,42	128,57	130,45	136,25	112,76	105,05	117,45	115,55
RSRP TRESHOLD (fading)	[dBm]	-110,95		-116,58		-115,95		-100,05		-107,55	
RSRP TRESHOLD (margins)	[dBm]	-90,95		-96,58		-97,95		-73,05		-83,55	

Tabla 3.33: Comparación Link Budgets VoLTE en banda 2600 MHz

siguiente capítulo, con el valor de RSRP de corte utilizado en el *link budget* de datos de Entel. Según lo obtenido, el valor de corte es levemente superior al de la red de datos, por lo que se esperaría una leve ganancia de cobertura en comparación a la red de datos de la banda 2600 MHz.

3. El punto anterior no concuerda con lo esperado de forma teórica, donde se esperaba una pérdida de cobertura de VoLTE frente a la red de datos. Esto puede ser explicado gracias al bajo nivel objetivo SINR utilizado en el *link budget* de VoLTE, el cual se fue logrado gracias al *feature* TTI Bundling. Este hecho cambia si se considera el escenario pesimista propuesto al modificar los valores de IM y SINR, pues tanto el MAPL como los valores de corte RSRP disminuyen en 3 [dB]. Finalmente se establece que incorporando los márgenes en el valor del MAPL, el valor final obtenido es menor al de la red de datos, concordando con la teoría.

4. El valor de SINR de la red ajustada de Entel para VoLTE refleja que la velocidad requerida por VoLTE es muy baja, y por ende tiene asociado niveles extremadamente bajos de SINR objetivo. Estos valores escapan al rango factible de SINR, corroborando que obtener el SINR objetivo a partir del *throughput* objetivo de borde de celda no es posible.
5. El valor de SINR calculado por el consultor VoLTE ha sido generado considerando 352 kbps como tasa de bits bruta en vez de 17,6 kbps. El error cometido ha sido confundir el tamaño del paquete VoLTE obtenido a partir del dimensionamiento, con la velocidad de datos de transferencia.
6. Se destaca que una diferencia importante en los cálculos pertenece a los márgenes, puesto que estos no son incluidos en el cálculo del RSRP de corte para las simulaciones, obviando una parte importante del valor del MAPL final.

700 Mhz	Unit	Entel BE		Entel Adjust*		Vendor E		Consultor Q		Memoria	
		DL	UP	DL	UP	DL	UL	DL	UL	DL	UL
nPRB	#	16	8	10	3	-	-	10	2	10	3
TX maximum transmission power	[dBm]	46	23	46	23	-	-	-	23	46	23
TX output power per antenna	[dBm]	36,28	23	34,24	23	-	-	43	-	43	23
TX Power per RB	[dBm]	-	-	-	-	-	-	27,26	20	24,3	18,2
TX Antenna Gain	[dBi]	16	0	16	0	-	-	14	-4,5	16	-1
TX connectors, combiners & jumpers	[dB]	0,5	0	0,5	0	-	-	0,5	0	0,5	0
TX cable loss	[dB]	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0
TX Total Losses	[dB]	0,5	0	0,5	0	-	-	0,5	0	0,5	0
EIRP	[dBm]	51,78	23	49,74	23	-	-	40,76	15,5	39,8	17,2
RX Antenna Gain	[dBi]	0	16	0	16	-	-	-4,5	14	-1	16
RX Total Losses	[dB]	0	1	0	1	-	-	0	0,5	0	0,5
RX GAIN - LOSSES	[dB]	0	15	0	15	-	-	-4,5	13,5	-1	15,5
RX Noise Figure	[dB]	7	2	7	2	-	-	7	3	7	2,5
RX Noise Floor	[dBm]	-109,41	-112,42	-111,45	-116,68	-	-	-121,45	-121,45	-121,45	-121,45
SIRmin (linear)	#	-	-	-	-	-	-	-	0,5	0,5	0,5
Target cell load (linear)	%	79	79	87	87	-	-	70	50	70	50
IM-Interference margin	[dB]	0,5	1,5	0,5	1,5	-	-	3	3	1,9	3
Antenna diversity Gain	[dBi]	2	0	2	0	-	-	0	0	0	0
VoLTE Gain Features	[dB]	0	0	0	0	-	-	0	3	0	3
SINR	[dB]	4,7	-3,57	-9	-5,06	-	-	-2,5	1,5	-6	-4,3
Body Loss (UE side) margin	[dB]	0	0	2	3	-	-	5	5	3	3
SENSITIVITY	[dBm]	-99,21	-112,49	-113	-115,2	-	-	-108,95	-108,95	-115,55	-117,25
MAPL (without margins)	[dB]	150,99	150,99	162,69	153,24	-	-	145,21	137,95	154,35	149,95
RSRP TRESHOLD	[dBm]	-121,54		-123,79		-		-110,50		-120,50	
Shadow standard deviation	[dB]	10	10	10	10	-	-	8,8	8,8	10	10
VoLTE edge reliability	%	90	90	90	90	-	-	95	95	95	95
Shadow margin (LNF)	[dB]	12,82	12,82	12,82	12,82	-	-	14,47	14,47	16,4	16,4
Building Penetration margin	[dB]	16	16	16	16	-	-	17	17	15	15
MARGINS	[dB]	28,82	28,82	30,82	31,82	-	-	36,47	36,47	34,40	34,40
MAPL (with margins)	[dB]	122,17	121,67	131,87	121,42	-	-	108,74	101,48	119,95	115,55
RSRP TRESHOLD (fading)	[dBm]	-108,72		-110,97		-		-96,03		-104,10	
RSRP TRESHOLD (margin)	[dBm]	-92,72		-94,97		-		-79,03		-89,10	

Tabla 3.34: Comparación Link Budgets VoLTE en banda 700 MHz

A partir de la tabla 3.34, se destaca:

1. El RSRP de corte calculado es menor que el de la banda 2600 MHz, sin embargo el MAPL calculado es superior. Esto se debe a que el RSRP de corte no incorpora los márgenes de penetración y LNF.
2. Al igual que en la banda 2600 MHz, el valor de SINR calculado por el consultor VoLTE ha sido generado considerando 704 kbps como tasa de bits bruta en vez de 17,6 kbps.
3. El consultor VoLTE ha utilizado 5 [dB] como *body loss margin*, valor alto que justifica mediante estudios propios de laboratorio que respaldan dichas pérdidas. Se ha realizado una búsqueda de *papers* que respalden estos datos, pero no se ha encontrado estudios que respalden dicha afirmación.

Capítulo 4

Simulaciones

En el presente capítulo se realizan simulaciones en base a los datos calculados en el punto 3.3.2. El objetivo de las simulaciones es estudiar con datos reales de la red LTE de Entel las diferencias de cobertura entre la red de datos (*Best Effort*) y la futura red VoLTE, cuantificando el área y porcentaje de cobertura en que difieren entre ambas. Para ello, se realizarán inicialmente simulaciones sobre un grupo pequeño de sectores para estudiar el impacto del *feature TTI Bundling*. Posteriormente se simulará la cobertura de la red *Best Effort* LTE de Entel y la futura cobertura de la red VoLTE de Entel, para las bandas 2600 MHz y 700 MHz, y cada una para su enlace ascendente (*uplink*) y descendente (*downlink*). Se finalizará el capítulo con un resumen de los resultados y conclusiones obtenidas a partir de estos.

4.1. Descripción del Software

Mentum Planet, programa diseñado por la empresa InfoVista, es un mundialmente reconocido *software* de planificación y optimización de redes de radio-frecuencia. El *software* permite a los operadores móviles establecer una base para una planificación ágil y eficiente de la red de acceso inalámbrico (RAN).



Figura 4.1: Logo Software Mentum Planet

Algunas de las principales características de Mentum Planet son [77]:

- Soporte Multi-RAN: Planet soporta la mayoría de los estándares inalámbricos desplegados comercialmente, incluyendo GSM, GPRS, EDGE, WCDMA, HSPA,

HSPA+, LTE (TDD y FDD), LTE-Advanced, IoT (celulares y no celulares), Wi-Fi, WiMAX, cdma2000, EVDO, iDEN, TETRA, P25 y sistemas TDMA/FDMA genéricos utilizando simulcast.

- Planificación de redes móviles en tiempo real: La planificación de RF en vivo garantiza que los procesos se basen en configuraciones de red móvil en vivo, cargas reales de tráfico y rendimiento de la red móvil conocida.
- Soporte para células pequeñas: Planet ofrece una gama completa de capacidades para apoyar el despliegue exitoso de células pequeñas, incluyendo evaluación estratégica, consideraciones de *backhaul* y características de planificación de red automatizadas para optimizar la eficiencia espectral y el retorno de la inversión.
- Modelado Avanzado de Antenas y Biblioteca de Antenas Gestionadas por Proveedores: Planet ofrece un modelado completo del sistema de antena que soporta las técnicas más avanzadas como 3D *Beamforming* y MIMO masivo, facilitando a los usuarios obtener acceso directo a los datos de antena a través de un sistema integrado en línea de biblioteca de antenas.
- Diseñado para planificación y automatización de RF basadas en escenarios: Planet ofrece capacidades incomparables para gestionar simultáneamente varios escenarios de planificación de redes móviles, lo que permite a los operadores considerar y comparar varios diseños y seleccionar el mejor. Además, Planet viene con la capacidad de programar y automatizar las tareas de planificación RF, ya sea de forma local o de servidor.



Figura 4.2: Ejemplos con modelos 3D de Mentum Planet

Para las simulaciones del presente capítulo se utilizó la versión 5.7 de Mentum Planet, la cual fue lanzada en Paris, Francia, el 16 de Diciembre del 2013, e incorporó nuevas funcionalidades, tales como soporte para la ganancia de programación selectiva de frecuencia, programación semi-persistente y agrupación TTI (*TTI Bundling*). Esta última funcionalidad será de especial importancia para las simulaciones realizadas, pues *TTI Bundling* es un *feature* muy importante y recomendado para aumentar la cobertura VoLTE.

4.2. Hardware Utilizado y Especificaciones la Red

4.2.1. Hardware Utilizado

Para la realización de las simulaciones del presente capítulo se empleó el *notebook* personal del alumno memorista, pues este poseía las mejores características entre los dispositivos disponibles. Las principales características del *hardware* utilizado se resumen en la tabla 4.1.

Computador HP Pavilion Gaming 15-ak006la	Valor	Unidad	Comentario
Procesador	2.6 - 3.5	GHz	Intel Core i7-6700HQ, Quad Core
Memoria RAM	16	GB	DDR3L-SDRAM 1600 MHz
Disco Duro	480	GB	SSD M.2 6Gbps, R/W 520Mbps
Tarjeta Gráfica	4	GB	NVIDIA Geforce GTX 950M

Tabla 4.1: Características del Hardware Utilizado para Simular

4.2.2. Datos y Configuraciones de la Red LTE de Entel

A continuación se describen los datos de red previamente cargados por Entel en Mentum Planet. En la tabla 4.2 se puede apreciar la configuración principal de la red, con los datos de bandas utilizadas, modulaciones disponibles para el enlace descendente como ascendente, y otros parámetros concernientes a la interferencia y *slow fading*.

Datos de Red	Banda 2600	Banda 700
Frecuencia Central DL	2655 MHz	785,5 MHz
Frecuencia Central UL	2535 MHz	730,5 MHz
Ancho de Banda	20 MHz	15 MHz
Modulaciones en Downlink	QPSK (1/3, 1/2, 2/3, 4/5) 16QAM (1/2, 2/3, 4/5) 64QAM (2/3, 4/5)	QPSK (1/3, 1/2, 2/3, 4/5) 16QAM (1/2, 2/3, 4/5) 64QAM (2/3, 4/5)
DL SINR requerido	QPSK (-1, 1, 3, 4.5) 16QAM (2, 2.67, 3.2) 64QAM (4, 4.8)	QPSK (-1, 1, 3, 4.5) 16QAM (2, 2.67, 3.2) 64QAM (4, 4.8)
Modulaciones en Uplink	QPSK (1/3, 1/2, 4/5) 16QAM (1/2, 2/3)	QPSK (1/3, 1/2, 4/5) 16QAM (1/2, 2/3)
UL SINR requerido	QPSK (-1.1, 1, 4.5) 16QAM (6.2, 7.5)	QPSK (-1.1, 1, 4.5) 16QAM (6.2, 7.5)
Coordinador de Interferencia	Coordinador Estático Tamaño de la FFT: 2048 Frec. de Muestreo: 30.72 MHz Factor Rehuso: 3 RB Inter Celda: 50%	Coordinador Estático Tamaño de la FFT: 1536 Frec. de Muestreo: 23.04 MHz Factor Rehuso: 3 RB Inter Celda: 50%
Slow-Fading	Modelo de Correlación Angular Alpha= 5 grados B= 0.6 Beta= 70 grados Factor Intra-Sitio: 0.73 RhoZero: 0.83	Modelo de Correlación Angular Alpha= 5 grados B= 0.6 Beta= 70 grados Factor Intra-Sitio: 0.73 RhoZero: 0.83

Tabla 4.2: Configuración de la red LTE previamente cargados por Entel

Los datos de la tabla 4.2 son cargados en el programa Mentum Planet en el menú *Edit >Network Settings*. Además de estos datos de red, es necesario crear un perfil con los datos de los suscriptores, o usuarios de la red. Esto se crea en el menú *Edit >Subscriber Settings*. La tabla 4.3 contiene los principales datos de los perfiles de suscriptores cargados por Entel.

Tipo de Equipos	Smartphone 4G Gama Alta
LTE Release	9
Máx. Potencia	23 dBm
Figura de Ruido	7 dB
Bandas Permitidas	LTE 2600 LTE 700
Soporte TTI Bundling	SI
Tipo de Antena	Omnidireccional
Ganancia de Antena	0 dBi
MIMO Transmisor	1
MIMO Receptor	2
Servicios	Datos 4G 5/1Mbps DL/UL
Carga	0.058 Erlangs por Suscriptor 5000 Kbps
Factor de Actividad	DL 20 % UL 20 %
Calidad de Servicio	LTE CQI: 7 Vel. Min. DL: 128 Kbps Vel. Máx. DL: 100000 Kbps Vel. Min. UL: 64 Kbps Vel. Máx. UL: 50000 Kbps Prob. borde de celda: 90 % Pérdida de Cuerpo: 1.5 dB UL FER/PER: 2 % DL FER/PER: 2 % Latencia Objetivo: 16 espacios
Tipo de Suscriptor	SmartPhone 4G Gama Alta
Tipo de Uso	Datos 4G 5/1Mbps DL/UL

Tabla 4.3: Configuración de suscriptores previamente cargada por Entel

Las dos tablas anteriores contienen los principales datos y configuraciones de la red, los cuales han sido cargados por el área de planificación de red de Entel. Estos datos no serán modificados, pues se asumen como parte íntegra y esencial de la red LTE de Entel.

Finalmente, se utilizará data de tráfico real, correspondiente al día jueves 9 de marzo del 2017. El día fue elegido al azar, y se procuró realizar todas las simulaciones en base al mismo día.

4.2.3. Área Simulada

Como se planteó en el punto 1.4.2, en particular con la figura 1.1, el área comprendida para el desarrollo de las simulaciones abarca la ciudad de Santiago y parte de su contorno no urbanizado. Para poder utilizar el polígono de la figura 1.1, se ha transformado al formato *.tab*, cargándolo al simulador como un área local. El área se puede visualizar en la figura 4.3 de color celeste, en tanto que de color negro se visualizan los contornos de los edificios de Santiago cargados al programa por Entel (modelo tridimensional).

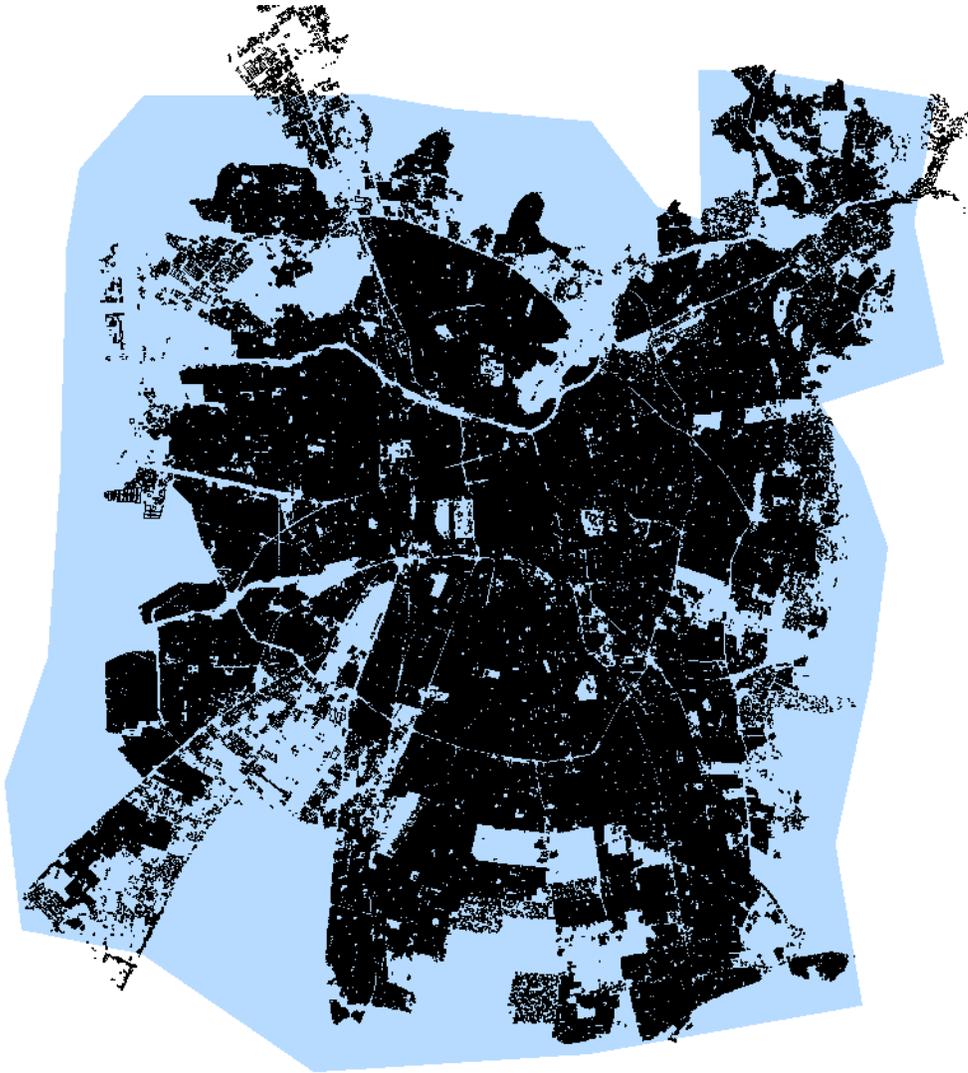


Figura 4.3: Área de Simulación y Edificios Santiago

4.3. Set de Simulaciones

En ésta sección se presentarán sets de simulaciones realizados en Mentum Planet. Para ello, previamente se debe incorporar un servicio VoLTE al simulador, además de habilitar la capacidad TTI *Bundling* de los terminales móviles, en el menú *Edit >Subscriber Settings* de Mentum Planet, como se ve en la figura 4.4. Se procederá a realizar los siguientes ajustes:

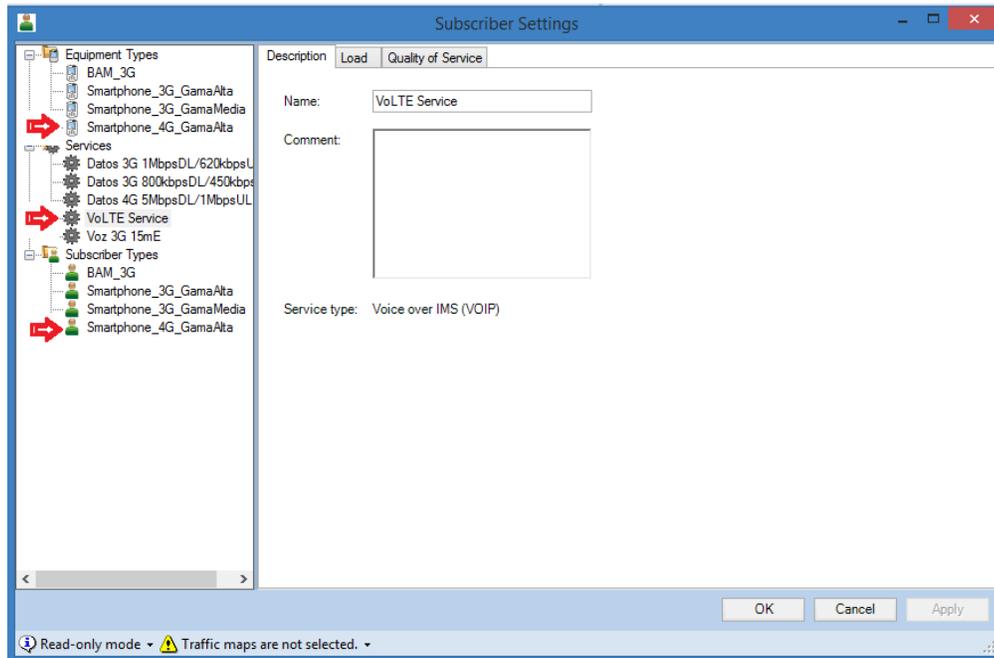


Figura 4.4: Menú *Subscriber* de Mentum Planet

1. En servicios (*Services*), se creará un servicio VoLTE con los datos expuestos en la tabla 4.4.

SERVICIO VOLTE	
Carga	
Erlangs por suscriptor	0.025 E
Throughput por suscriptor	32 Kbps
Factor de Actividad DL	70 %
Factor de Actividad UL	50 %
Calidad de Servicio	
QoS	1
Máxima tasa de Descarga	12,65 Kbps
Máxima tasa de Subida	12,65 Kbps
Probabilidad de Cobertura en Borde de Celda	95 %
Pérdida de Cuerpo	3 dB
FER Requerido UL	1 %
FER Requerido DL	1 %
Scheduler	Semi-persistente
Soporte de TTI Bundling	Activo

Tabla 4.4: Datos incorporados como servicio VoLTE

- Luego, en tipos de equipos (*Equipment Types*), se editará el equipo "SmartPhone 4G GamaAlta", cambiando su tecnología a LTE FDD Release 9, y posteriormente habilitando TTI Bundling (Mentum Planet reconoce TTI Bundling a partir del *release* 9).
- Finalmente, se editará el tipo de suscriptor (*Subscriber Type*) "SmartPhone 4G GamaAlta", añadiendo el servicio de VoLTE creado en el punto 1, como se verifica en la figura 4.5.

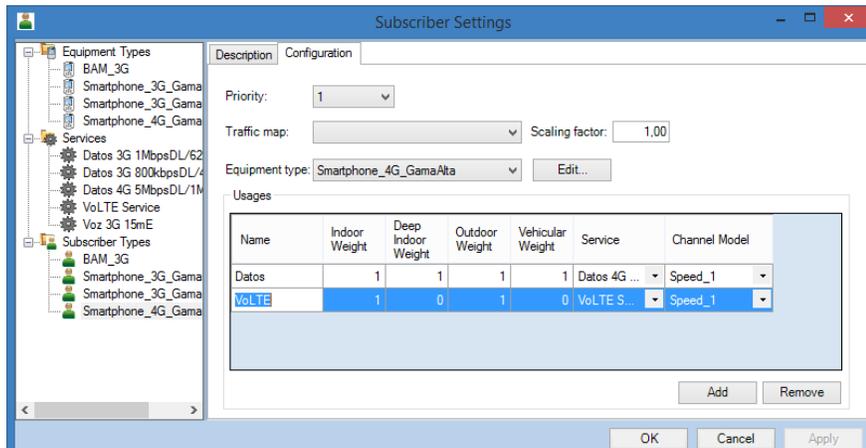


Figura 4.5: Menú *Subscriber* de Mentum Planet

Además de los pasos anteriores, se debe incorporar manualmente el SINR objetivo del *feature* TTI Bundling. Para ello se debe acceder al menú *Edit > Network Settings*, donde en la pestaña *Network Technologies > LTE FDD > Modulations > Uplink* (fig. 4.6) se debe cambiar los valores de "TTI Bundling Required C/(N+I)", equivalente al SINR objetivo con TTI Bundling. Se ajustará los valores de modulación QPSK a 3 [dB] menos que los valores sin TTI Bundling.

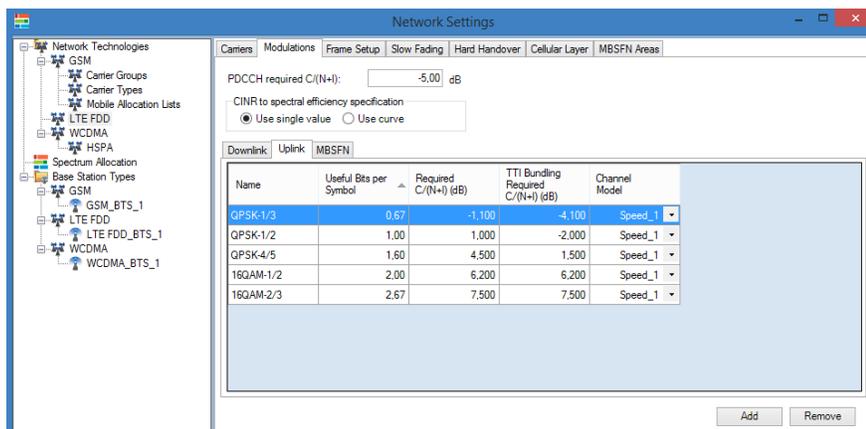


Figura 4.6: Menú *Subscriber* de Mentum Planet

Mediante estos pasos se ha cargado los datos de un servicio VoLTE al simulador, junto con los datos necesarios para el *feature* TTI Bundling.

4.3.1. Primer Set de Simulación: Estudio de TTI Bundling

En el primer set de simulaciones se estudia la ganancia de cobertura otorgada por el *feature* TTI *Bundling* para el enlace ascendente (*uplink*). Como se vio en la sección 2.5.6.3, TTI *Bundling* trabaja únicamente con modulación QPSK, y está limitado a un máximo de 3 PRBs. TTI *Bundling* funciona básicamente enviando el mismo paquete en 4 TTIs consecutivos pero con diferentes bits de detección y de corrección de errores, mejorando sustancialmente la probabilidad de una correcta decodificación por parte del UE, permitiendo expandir el radio de cobertura para *uplink*.

Las simulaciones consisten en comparar la cobertura del enlace ascendente de los sitios LTE bajo una red con servicio VoLTE con TTI Bundling activo y otro servicio VoLTE sin TTI Bundling, tanto para la banda de 2600 MHz como la banda de 700 MHz. Se considerará una ganancia asociada a TTI *Bundling* de 3 [dB] (según lo visto en 3.2.10), la que se incorporó al comienzo del punto 4.3.

El objetivo de este set de simulaciones es determinar la ganancia de cobertura (en kilómetros cuadrados y de forma porcentual) al habilitar el *feature* TTI Bundling para el enlace ascendente, en una red con servicio VoLTE.

4.3.1.1. Parámetros de las simulaciones

Se realizó dos conjuntos de simulaciones, una para la banda de 2600 MHz y otra para la banda de 700 MHz. Los datos de los parámetros de la simulación LTE FDD se visualizan en la tabla 4.5.

Configuración Primer Set de Simulaciones	
Sitios	
Sitios LTE Utilizados	475 sitios (1418 antenas 2600 MHz) 286 sitios (856 antenas 700 MHz) 477 sitios en total (2274 antenas)
Parámetros de Simulación LTE FDD	
Bandas Simuladas	2600 y 700 MHz
Tipo de Red	VoLTE
Probabilidad de Cobertura en Borde de Celda	95 %
RSRP de Corte	-107,55 (2600) y -104,1 (700) dBm
Covertura UL requerida	SI
nPRB UL	2 a 10 PRBs
Parámetro Variable	Uso de TTI Bundling (SI/NO)

Tabla 4.5: Parámetros del Primer Set de Simulaciones

4.3.1.2. Resultados de la simulación en banda 2600 MHz

La simulación, en conjunto con la banda 700 MHz, tardó alrededor de 18 horas, pesando aproximadamente 96 GB. Esto se debió a que se simuló todas las capas que Mentum Planet permite, pues esta simulación se utilizó, además, para visualizar otros aspectos concernientes al estudio de la red LTE por parte del alumno. En la figura 4.7 se puede apreciar con color verde claro la cobertura que se logra con los parámetros de VoLTE sin TTI Bundling activo, y en color azul se aprecia la ganancia de cobertura que se obtiene activando TTI Bundling (capa sin TTI Bundling está superpuesta sobre la capa con TTI bundling).

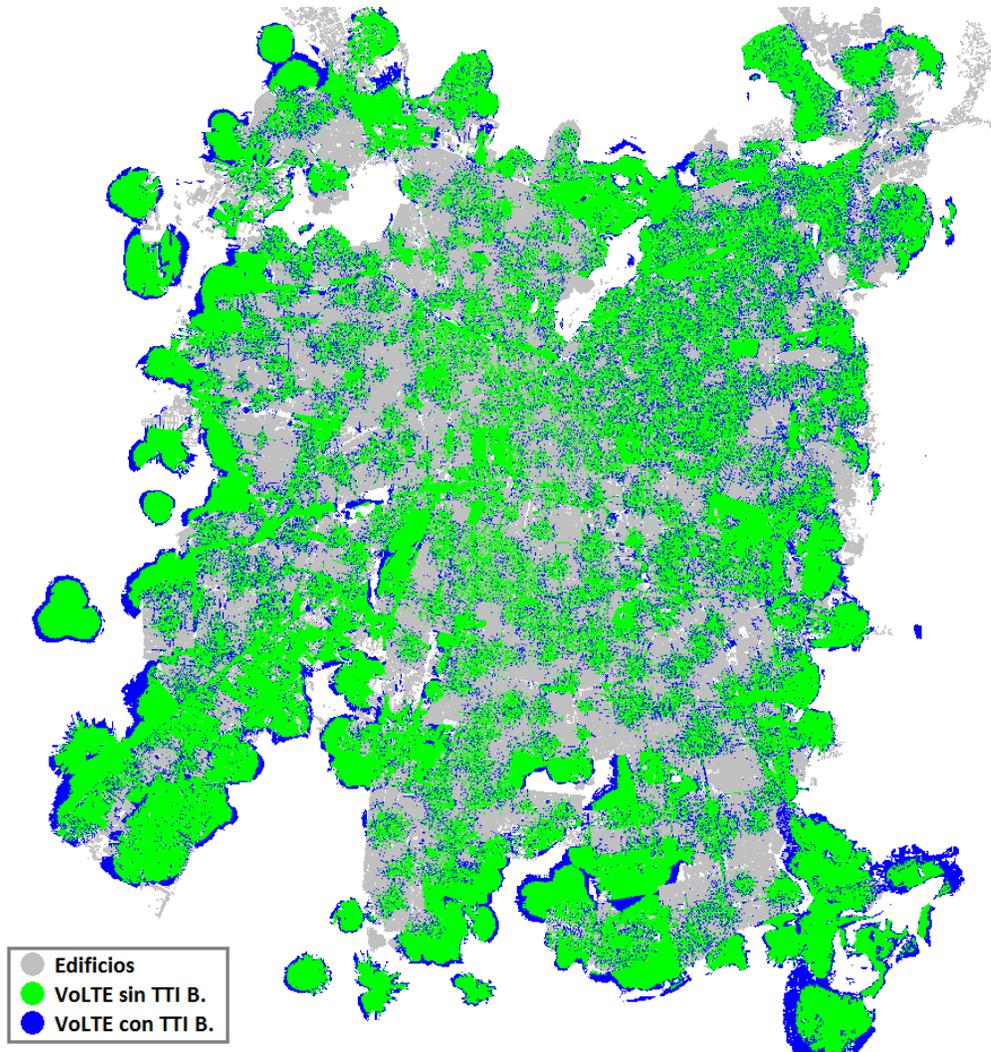


Figura 4.7: Resultado gráfico de simulación TTI Bundling en banda 2600 MHz

Se cruzó los datos obtenidos de la simulación con la capa estadística (menú *Layer Statistics*), obteniendo el área de cobertura y porcentaje de cobertura del área total. Con este fin se utilizó el área total de Santiago como polígono. Los resultados de éste proceso se resumen en la tabla 4.6.

Se aclara que la ganancia porcentual expresada en la tabla 4.6 es sobre el área originalmente cubierta, es decir, se obtuvo una ganancia del 20,19 % respecto al área original cubierta de

Resultado Simulación Cobertura TTI Bundling - 2600 MHz		
	VoLTE sin TTI Bundling	VoLTE con TTI Bundling
Área Total Polígono Santiago	703,92 km ²	
Área Cubierta	293,13 km ²	352,31 km ²
Porcentaje Cubierto	41,64 %	50,05 %
Ganancia en Área	59,18 km²	
Ganancia Porcentual	20,19 %	

Tabla 4.6: Resultados Simulación Cobertura TTI Bundling - 2600 MHz

293,13 km², y no sobre el área total de Santiago, en cuyo caso la ganancia sería de apenas 8,86 %.

4.3.1.3. Resultados de la simulación en banda 700 MHz

De forma análoga a la simulación en la banda de 2600 MHz, en la figura 4.8 se puede apreciar con color naranja la cobertura que se logra con los parámetros de VoLTE sin TTI Bundling activo, y en color burdeo se aprecia la ganancia de cobertura que se obtiene activando TTI Bundling (capa sin TTI Bundling está superpuesta sobre la capa con TTI bundling) para la banda de 700 MHz.

Se cruzó los datos obtenidos de la simulación con la capa estadística, obteniendo el área de cobertura y porcentaje de cobertura del área total. Se utilizó el área total de Santiago como polígono. Los resultados de éste proceso se resumen en la tabla 4.7.

Resultado Simulación Cobertura TTI Bundling - 700 MHz		
	VoLTE sin TTI Bundling	VoLTE con TTI Bundling
Área Total Polígono Santiago	703,92 km ²	
Área Cubierta	253,36 km ²	318,89 km ²
Porcentaje Cubierto	35,99 %	45,30 %
Ganancia en Área	65,00 km²	
Ganancia Porcentual	25,66 %	

Tabla 4.7: Resultados Simulación Cobertura TTI Bundling - 700 MHz

Se obtuvo una ganancia del 25,66 % respecto al área original cubierta de 253,36 km², y no sobre el área total de Santiago, en cuyo caso la ganancia sería de 9,31 %.

4.3.1.4. Análisis de resultados del 1er Set de Simulaciones

A partir de las dos simulaciones realizadas en el primer set de simulaciones, se concluye:

- La ganancia de cobertura otorgado por el *feature* TTI Bundling es superior al 20 % respecto a la cobertura original, siendo un impacto notorio en la ganancia de cobertura

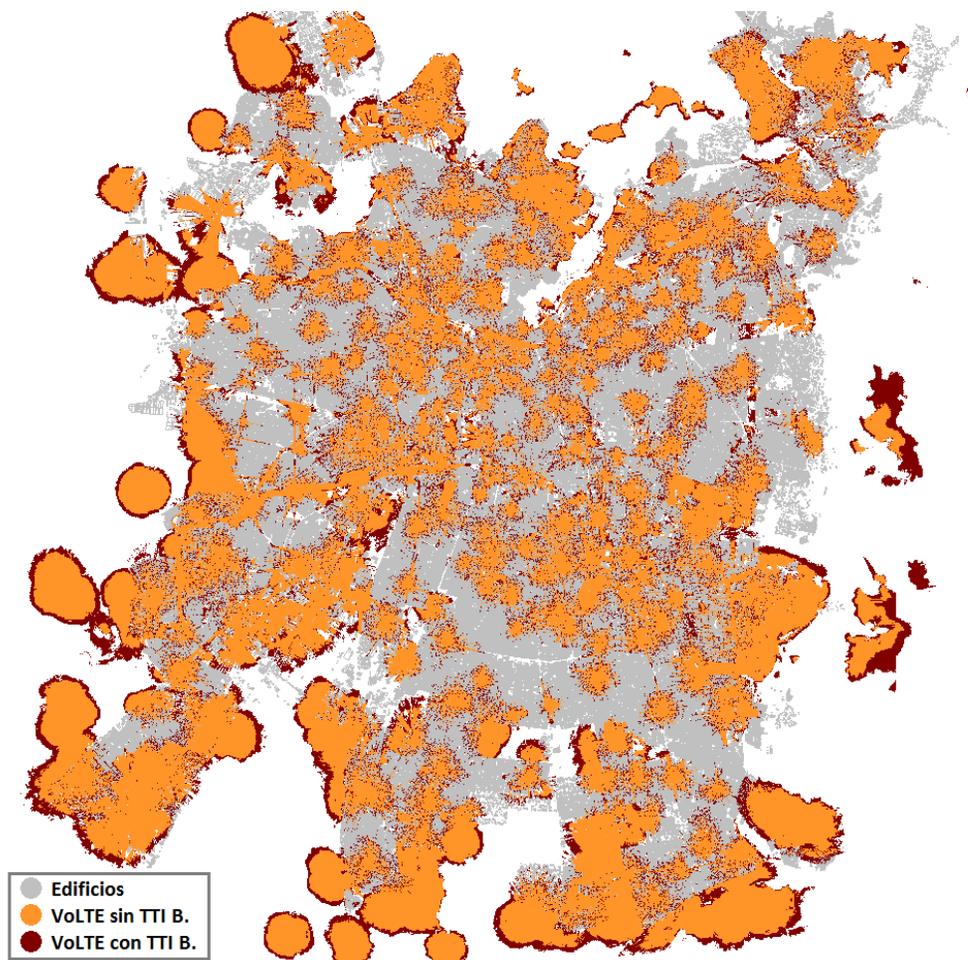


Figura 4.8: Resultado gráfico de simulación TTI Bundling en banda 700 MHz

(entre un 20 y un 25 %). En la banda 2600 se mejoró en un 20,19 % la cobertura, mientras que en 700 MHz se mejoró en un 25,66 %.

- El bajo porcentaje de cobertura se debe principalmente a dos factores: El primero es que se utilizó un área mayor a la del *clutter* de Santiago, por lo que se incorporó importantes áreas que no poseen cobertura. Y el segundo factor es que se simuló con el RSRP de corte considerando el margen de *fading* (en vez de utilizar el RSRP de corte puro). Esto se realizó para incluir en la simulación el efecto de tener mayores márgenes en redes VoLTE que en redes de datos.
- La cobertura de la banda de 700 MHz es menor que el de la banda 2600 MHz principalmente debido a que existen muchos más sitios LTE de 2600 MHz que sitios LTE de 700 MHz (475 contra 286 sitios respectivamente), con 562 antenas menos. Sin embargo, se puede apreciar comparando las figuras 4.7 y 4.7, que la banda 700 MHz, pese a poseer un menor RSRP de corte, posee un mayor radio de cobertura. Esto se puede visualizar de mejor manera en los sectores de borde de la ciudad.

4.3.2. Segundo Set: Cobertura Datos vs VoLTE - 2600 MHz

El segundo set de simulaciones estudia la cobertura de la red de datos (*Best Effort*) de Entel y la compara con la cobertura VoLTE obtenida en la banda de 2600 MHz, tanto para el enlace ascendente como descendente. Se tiene de esta forma dos simulaciones independientes para el presente set.

Las simulaciones consisten en comparar la cobertura de los servicios de datos y VoLTE, en sus dos enlaces, *downlink* y *uplink*. Para el servicio VoLTE se considera el *feature* TTI Bundling activo para el enlace ascendente. Se considerará además una ganancia asociada a TTI *Bundling* de 3 [dB] (según lo visto en 3.2.10), la que se incorporó en el punto 4.3.

4.3.2.1. Parámetros de las simulaciones

Se realizó una simulación para la red de datos de Entel (para *downlink* y para *uplink*) utilizando el set de parámetros de la tabla 4.8. Además, se realizó una simulación sobre la red con servicio VoLTE (tanto para *downlink* y como para *uplink*). Para estas simulaciones, se utilizó el set de parámetros de la tabla 4.9. Finalmente en la figura 4.9 se puede apreciar los 475 sitios de la banda 2600 MHz distribuidos en el área de Santiago.

Configuración Segundo Set de Simulaciones - BE 2600 MHz	
Sitios	
Sitios LTE Utilizados	475 sitios (1418 antenas 2600 MHz)
Parámetros de Simulación LTE FDD	
Bandas Simuladas	2600 MHz
Tipo de Red	Best Effort (datos)
Probabilidad de Cobertura en Borde de Celda	90 %
RSRP de Corte	-110,95 dBm (DL/UL)
Covertura UL requerida	SI
nPRB UL	1 a 10 PRBs
TTI Bundling	NO

Tabla 4.8: Parámetros 2do Set de Simulaciones - BE 2600 MHz

4.3.2.2. Resultados de las simulaciones para Downlink

En la tabla 4.10 se resume los valores obtenidos a partir de las simulaciones. Se compara área cubierta para la red *Best Effort* y para la red con servicio VoLTE. En tanto que en la figura 4.10 se puede realizar una comparación visual entre la cobertura de datos y la cobertura VoLTE simuladas para el enlace de *downlink*.

Configuración Segundo Set de Simulaciones - VoLTE 2600	
Sitios	
Sitios LTE Utilizados	475 sitios (1418 antenas 2600 MHz)
Parámetros de Simulación LTE FDD	
Bandas Simuladas	2600 MHz
Tipo de Red	VoLTE
Probabilidad de Cobertura en Borde de Celda	95 %
RSRP de Corte	-107.55 dBm (DL/UL)
Covertura UL requerida	SI
nPRB UL	2 a 10 PRBs
TTI Bundling	SI

Tabla 4.9: Parámetros 2do Set de Simulaciones - VoLTE 2600 MHz



Figura 4.9: Sitios LTE 2600 MHz en Santiago

Comparación Cobertura BE vs VoLTE - 2600 MHz Downlink		
	BE 2600 DL	VoLTE 2600 DL
Área Total Polígono Santiago	703,92 km ²	
Área Cubierta	418,96 km ²	346,59 km ²
Porcentaje Cubierto	59,49 %	49,24 %
Pérdida de Área	72,2 km²	
Pérdida Porcentual	17,24 %	

Tabla 4.10: Resultados Comparación Cobertura BE vs VoLTE - 2600 MHz Downlink

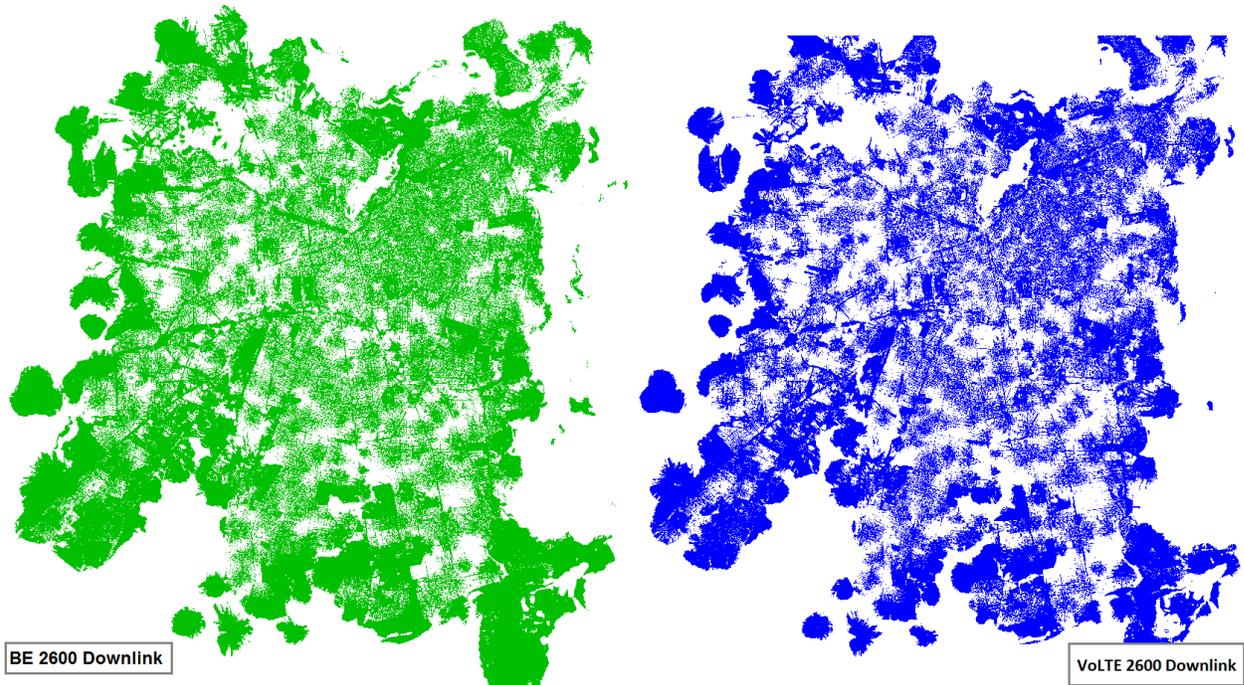


Figura 4.10: Cobertura BE vs VoLTE para banda 2600 MHz Downlink

4.3.2.3. Resultados de las simulaciones para Uplink

En la tabla 4.11 se resume los valores obtenidos a partir de las simulaciones en el enlace ascendente. Se compara área cubierta para la red *Best Effort* y para la red con servicio VoLTE. Se aprecia en la figura 4.11 la comparación visual entre la cobertura de datos y la cobertura VoLTE simuladas para *uplink*.

Comparación Cobertura BE vs VoLTE - 2600 MHz Uplink		
	BE 2600 UL	VoLTE 2600 UL
Área Total Polígono Santiago	703,92 km ²	
Área Cubierta	419,42 km ²	352,31 km ²
Porcentaje Cubierto	59,58 %	50,05 %
Pérdida de Área	67,11 km²	
Pérdida Porcentual	16 %	

Tabla 4.11: Resultados Comparación Cobertura BE vs VoLTE - 2600 MHz Uplink

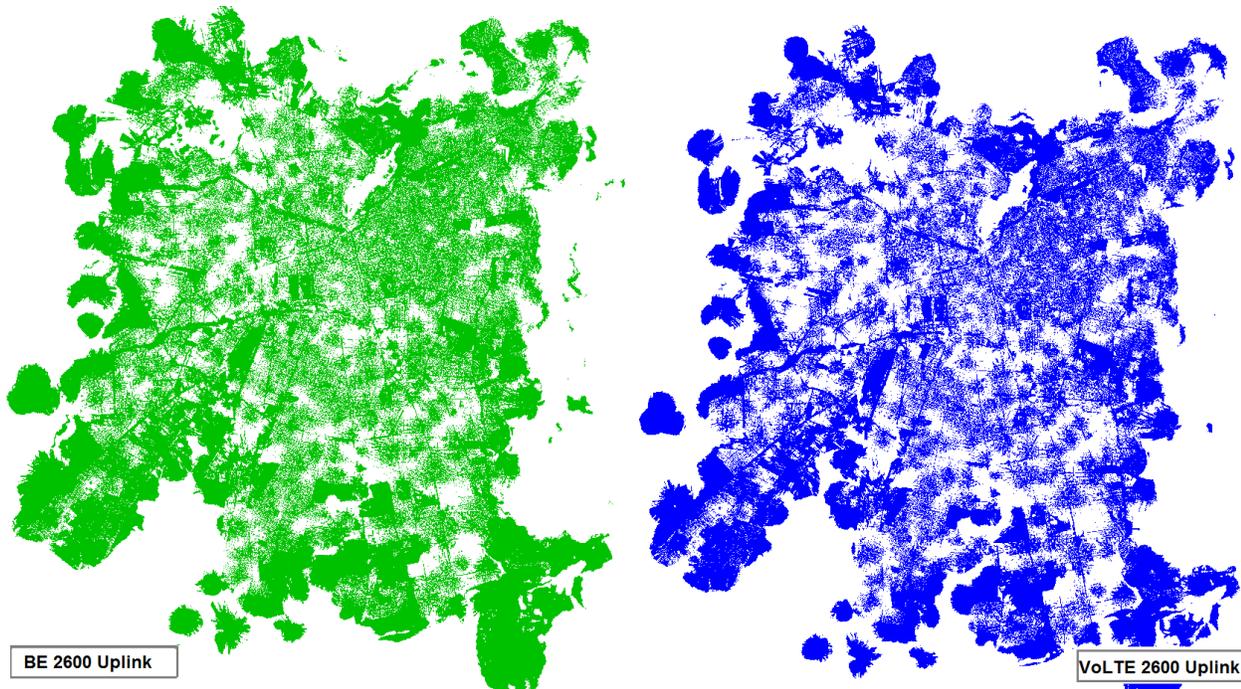


Figura 4.11: Cobertura BE vs VoLTE para banda 2600 MHz Uplink

4.3.2.4. Análisis de resultados del 2do Set de Simulaciones

A partir de las dos simulaciones realizadas en el segundo set de simulaciones, se concluye:

- El servicio VoLTE presenta una disminución de cobertura cercana al 17 % respecto a la red de datos actual de Entel en la banda de 2600 MHz cuando se considera desvanecimiento lento (LNF), tanto para su enlace descendente (*downlink*) como para el enlace ascendente (*uplink*).
- Comparando ambas simulaciones, se aprecia que las áreas de cobertura bajo un mismo servicio (datos o VoLTE) son muy similares entre enlace de distinto tipo. Esto quiere decir que la cobertura *downlink* es muy similar a la cobertura *uplink* para un mismo servicio. Este punto se debe principalmente a que se utilizó el peor MAPL para el RSRP de corte, por ende, se utiliza un mismo nivel de corte para ambos enlaces, lo que implica que en un escenario real la cobertura *downlink* podría ser ligeramente mejor.

4.3.3. Tercer Set: Cobertura Datos vs VoLTE - 700 MHz

El tercer set de simulaciones estudia, de forma análoga al segundo set, la cobertura de la red de datos (*Best Effort*) de Entel y la compara contra la cobertura VoLTE obtenida en la banda de 700 MHz, tanto para el enlace ascendente como descendente.

Las simulaciones consisten en comparar la cobertura de los servicios de datos y VoLTE, en sus dos enlaces, *downlink* y *uplink*. Se considerará una ganancia asociada a TTI *Bundling* de 3 [dB] (según lo visto en 3.2.10), la que se incorporó en el punto 4.3.

4.3.3.1. Parámetros de las simulaciones

Se realizó dos simulaciones sobre la red de datos de Entel (una para *downlink* y otra para *uplink*). Para estas simulaciones, se utilizó el set de parámetros de la tabla 4.12.

Configuración Segundo Set de Simulaciones - BE 700 MHz	
Sitios	
Sitios LTE Utilizados	286 sitios (856 antenas 700 MHz)
Parámetros de Simulación LTE FDD	
Bandas Simuladas	700 MHz
Tipo de Red	Best Effort (datos)
Probabilidad de Cobertura en Borde de Celda	90 %
RSRP de Corte	-108.72 dBm (DL/UL)
Covertura UL requerida	SI
nPRB UL	1 a 10 PRBs
TTI Bundling	NO

Tabla 4.12: Parámetros 3er Set de Simulaciones - BE 700 MHz

Además, se realizó dos simulaciones sobre la red con servicio VoLTE (una para *downlink* y otra para *uplink*). Para estas simulaciones se utilizó el set de parámetros de la tabla 4.13.

Finalmente se puede apreciar en la figura 4.12 los 286 sitios de la banda 700 MHz, utilizados en las simulaciones, distribuidos en el área de Santiago.

4.3.3.2. Resultados de las simulaciones para Downlink

En la tabla 4.14 se resume los valores obtenidos a partir de las simulaciones. Se compara área cubierta para la red *Best Effort* y para la red con servicio VoLTE. Se aprecia en la figura 4.13 la comparación visual entre la cobertura de datos y la cobertura VoLTE simuladas para el enlace de *downlink*.

Configuración Segundo Set de Simulaciones - VoLTE 700	
Sitios	
Sitios LTE Utilizados	286 sitios (856 antenas 700 MHz)
Parámetros de Simulación LTE FDD	
Bandas Simuladas	700 MHz
Tipo de Red	VoLTE
Probabilidad de Cobertura en Borde de Celda	95 %
RSRP de Corte	-104.10 dBm (DL/UL)
Covertura UL requerida	SI
nPRB UL	2 a 10 PRBs
TTI Bundling	SI

Tabla 4.13: Parámetros 3er Set de Simulaciones - VoLTE 700 MHz



Figura 4.12: Sitios LTE 700 en Santiago

Comparación Cobertura BE vs VoLTE - 700 MHz Downlink		
	BE 700 DL	VoLTE 700 DL
Área Total Polígono Santiago	703,92 km ²	
Área Cubierta	424,74 km ²	314,37 km ²
Porcentaje Cubierto	60,34 %	44,66 %
Pérdida de Área	110,37 km²	
Pérdida Porcentual	25,99 %	

Tabla 4.14: Resultados Comparación Cobertura BE vs VoLTE - 700 MHz Downlink

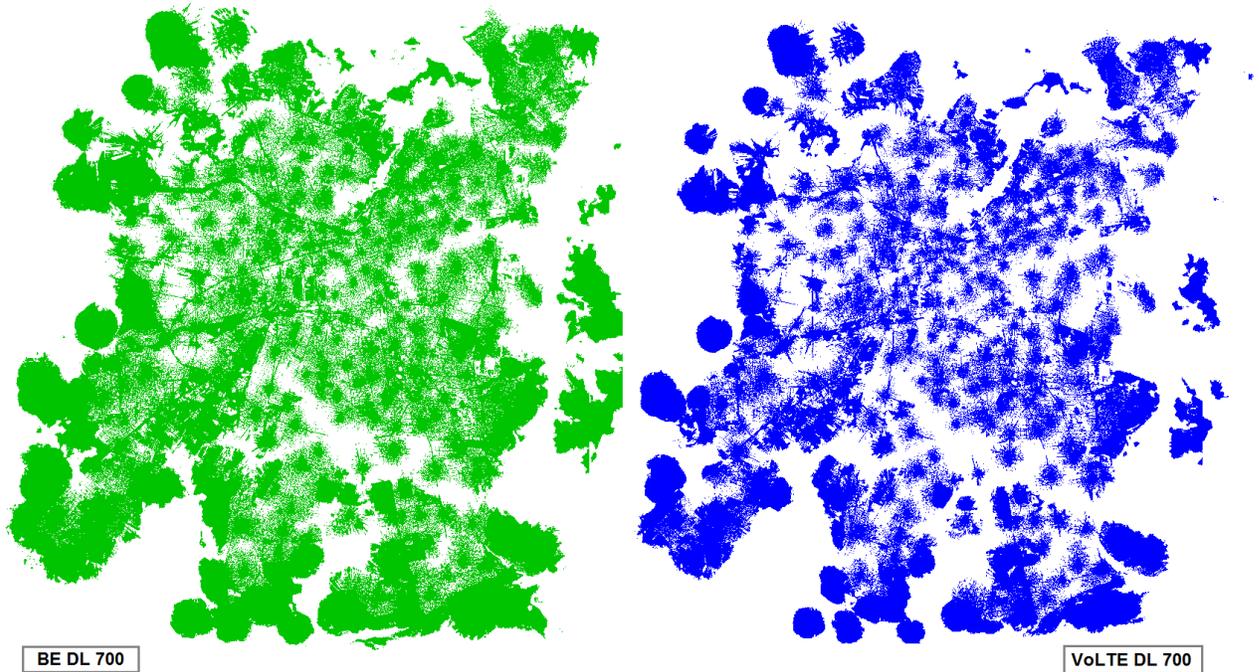


Figura 4.13: Cobertura BE vs VoLTE para banda 700 MHz Downlink

4.3.3.3. Resultados de las simulaciones para Uplink

En la tabla 4.15 se resume los valores obtenidos a partir de las simulaciones en el enlace ascendente. Se compara área cubierta para la red *Best Effort* y para la red con servicio VoLTE. Se aprecia en la figura 4.14 la comparación visual entre la cobertura de datos y la cobertura VoLTE simuladas para *uplink*.

4.3.3.4. Análisis de resultados del 3er Set de Simulaciones

A partir de las simulaciones realizadas en el tercer set de simulaciones, se concluye que:

- El servicio VoLTE presenta una disminución de cobertura que ronda el 25% respecto a la red de datos actual de Entel en la banda de 700 MHz, cuando se considera

Comparación Cobertura BE vs VoLTE - 700 MHz Uplink		
	BE 700 UL	VoLTE 700 UL
Área Total Polígono Santiago	703,92 km ²	
Área Cubierta	425,89 km ²	318,89 km ²
Porcentaje Cubierto	60,5 %	45,3 %
Pérdida de Área	107 km²	
Pérdida Porcentual	25,12 %	

Tabla 4.15: Resultados Comparación Cobertura BE vs VoLTE - 700 MHz Uplink

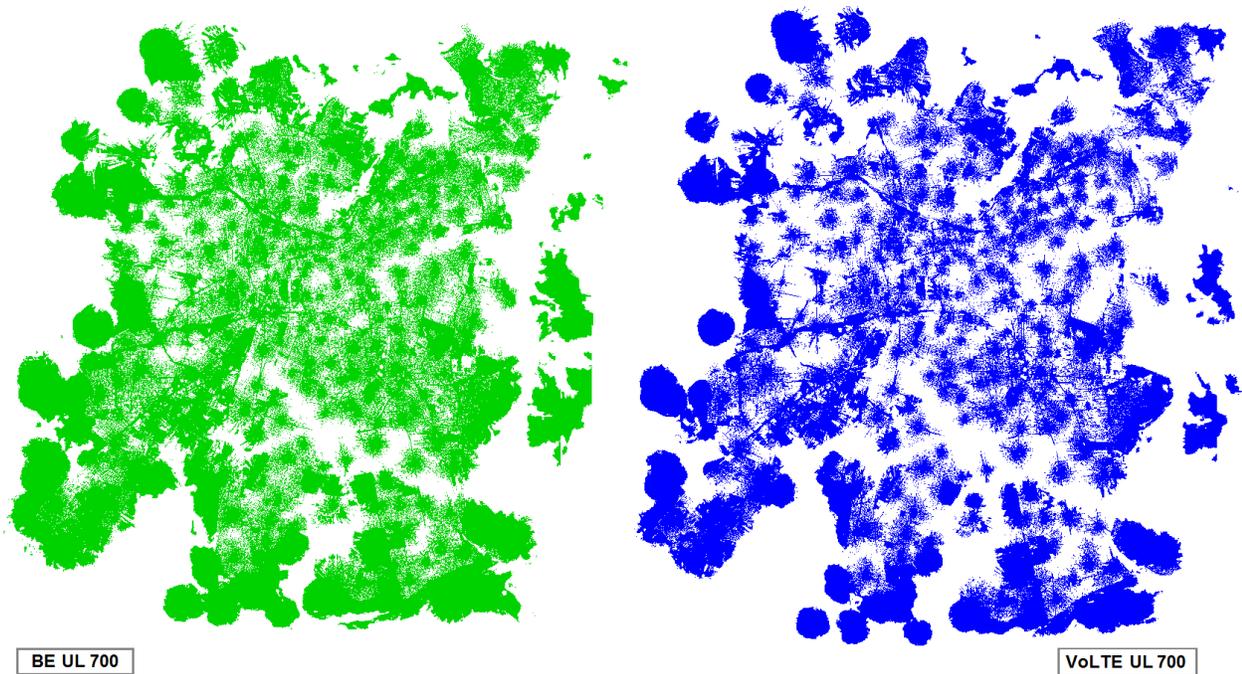


Figura 4.14: Cobertura BE vs VoLTE para banda 700 MHz Uplink

desvanecimiento lento (LNF), tanto para su enlace descendente (*downlink*) como para el enlace ascendente (*uplink*).

- Comparando visualmente ambas simulaciones, se aprecia que al existir menos sitios y antenas, el porcentaje de sitios solapados era mínimo, por lo que la pérdida de cobertura se acrecienta para la banda de 700 MHz.

4.3.4. Cuarto Set: Cobertura Datos vs VoLTE - Cobertura Conjunta

El cuarto set de simulaciones se compara la cobertura de la red de datos (*Best Effort*) de Entel y con la cobertura VoLTE al utilizar ambas bandas de frecuencia (2600 MHz y 700 MHz), para ambos enlaces. Se tiene de esta forma dos simulaciones; una para el enlace ascendente y otra para el descendente.

Las simulaciones consisten en comparar la cobertura de los servicios de datos y VoLTE, en sus dos enlaces, *downlink* y *uplink*. Se considerará una ganancia asociada a TTI *Bundling* de 3 [dB] (según lo visto en 3.2.10), la que se incorporó en el punto 4.3.

4.3.4.1. Parámetros de las simulaciones

Se realizó dos simulaciones sobre la red de datos de Entel (una para *downlink* y otra para *uplink*). Para estas simulaciones, se utilizó el set de parámetros de la tabla 4.16.

Configuración Cuarto Set de Simulaciones - BE	
Sitios	
Sitios LTE Utilizados	475 sitios (1418 antenas 2600 MHz) 286 sitios (856 antenas 700 MHz) 477 sitios en total (2274 antenas)
Parámetros de Simulación LTE FDD	
Bandas Simuladas	2600 y 700 MHz
Tipo de Red	Datos
Probabilidad de Cobertura en Borde de Celda	90 %
RSRP de Corte	-110,95 (2600) y -108,72 (700) dBm
Covertura UL requerida	SI
nPRB UL	1 a 10 PRBs
TTI Bundling	NO

Tabla 4.16: Parámetros del Primer Set de Simulaciones

En tanto que para el servicio VoLTE se utilizó los parámetros de la tabla 4.17.

Finalmente se puede apreciar en la figura 4.15 los sitios de ambas bandas distribuidos en el área de Santiago.

4.3.4.2. Resultados de las simulaciones para Downlink

Cada simulación tardó alrededor de 10 horas, utilizando 9,5 GB de espacio en disco duro. Se aprecia en la figura 4.16 la comparación visual entre la cobertura de datos y la cobertura VoLTE simuladas para el enlace de *downlink*.

Configuración Cuarto Set de Simulaciones - VoLTE	
Sitios	
Sitios LTE Utilizados	475 sitios (1418 antenas 2600 MHz) 286 sitios (856 antenas 700 MHz) 477 sitios en total (2274 antenas)
Parámetros de Simulación LTE FDD	
Bandas Simuladas	2600 y 700 MHz
Tipo de Red	VoLTE
Probabilidad de Cobertura en Borde de Celda	95 %
RSRP de Corte	-107,55 (2600) y -104,1 (700) dBm
Covertura UL requerida	SI
nPRB UL	2 a 10 PRBs
TTI Bundling	SI

Tabla 4.17: Parámetros del Primer Set de Simulaciones



Figura 4.15: Sitios LTE 2600 y 700 MHz en Santiago

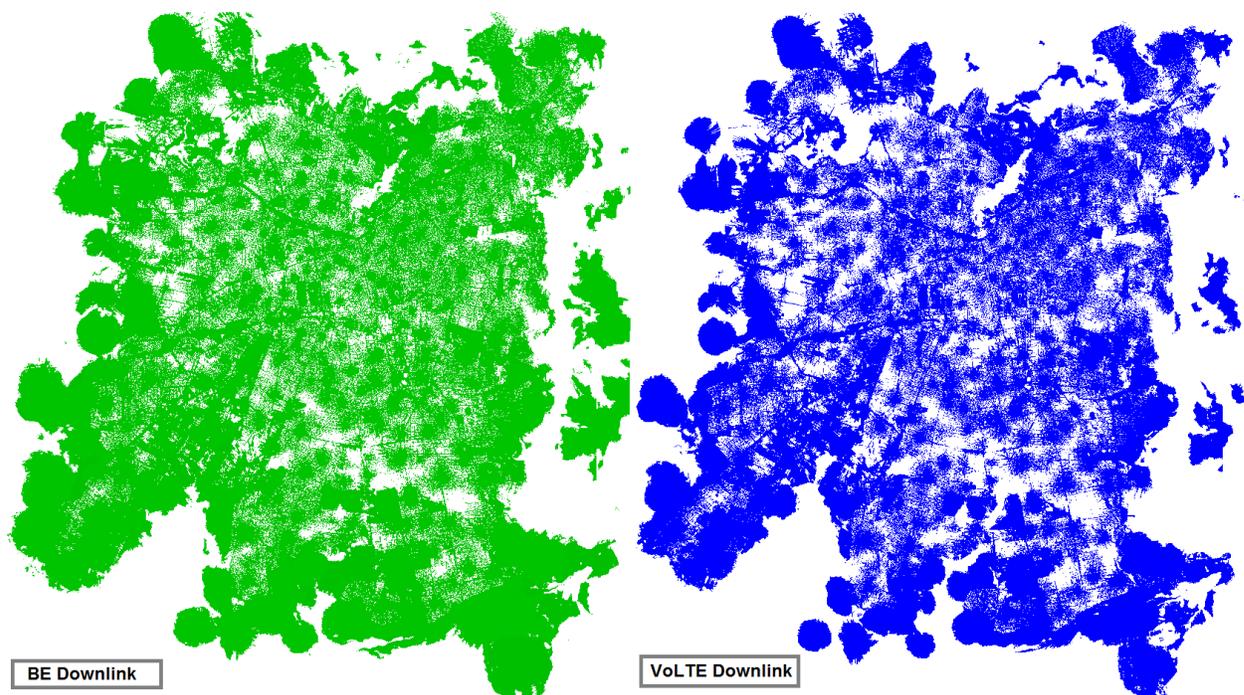


Figura 4.16: Comparación Cobertura BE vs VoLTE - Downlink

En la tabla 4.18 se resume los valores obtenidos a partir de las simulaciones. Se compara área cubierta para la red *Best Effort* y para la red con servicio VoLTE.

Comparación Cobertura BE vs VoLTE - Downlink		
	BE Downlink	VoLTE Downlink
Área Total Polígono Santiago	703,92 km ²	
Área Cubierta	504,55 km ²	425,76 km ²
Porcentaje Cubierto	71,68 %	60,48 %
Pérdida de Área	78,79 km²	
Pérdida Porcentual	15,62 %	

Tabla 4.18: Resultados Comparación Cobertura BE vs VoLTE - Downlink

4.3.4.3. Resultados de las simulaciones para Uplink

Cada simulación tardó alrededor de 10 horas, utilizando 9,5 GB de espacio en disco duro. Se aprecia en la figura 4.17 la comparación visual entre la cobertura de datos y la cobertura VoLTE simuladas para *uplink*.

En la tabla 4.19 se resume los valores obtenidos a partir de las simulaciones en el enlace ascendente. Se compara área cubierta para la red *Best Effort* y para la red con servicio VoLTE.

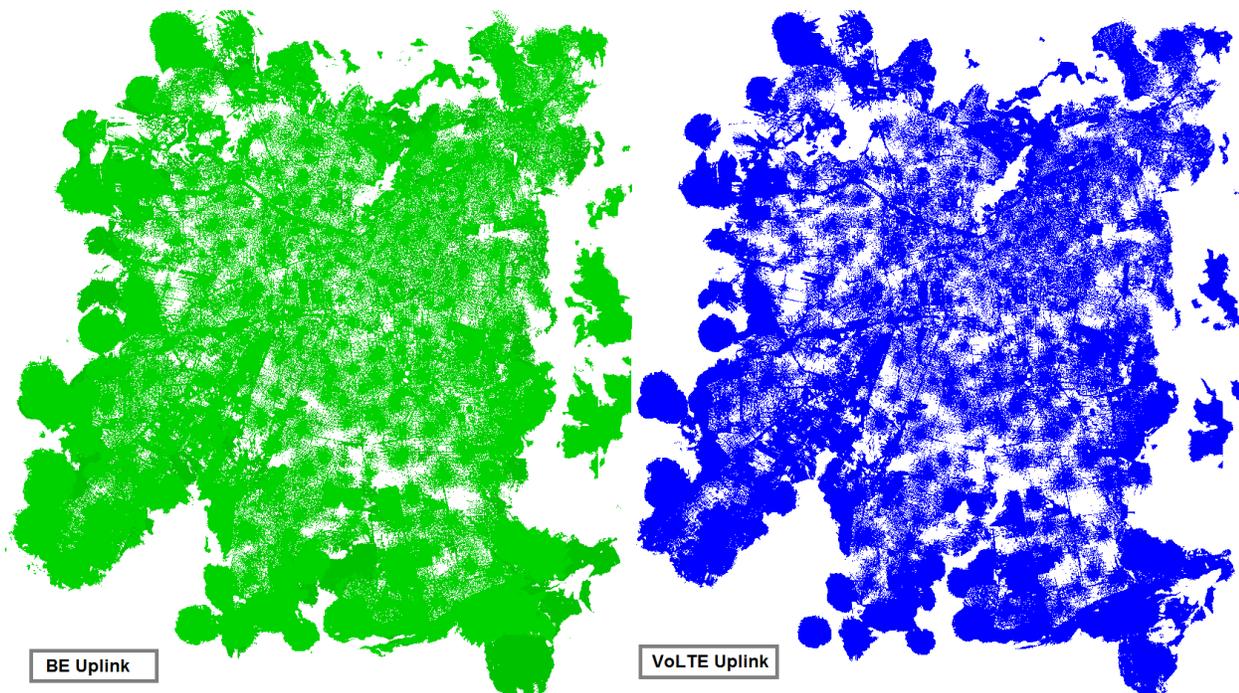


Figura 4.17: Comparación Cobertura BE vs VoLTE - Uplink

Comparación Cobertura BE vs VoLTE - Uplink		
	BE Uplink	VoLTE Uplink
Área Total Polígono Santiago	703,92 km ²	
Área Cubierta	504,8 km ²	428,03 km ²
Porcentaje Cubierto	71,71 %	60,81 %
Pérdida de Área	76,77 km²	
Pérdida Porcentual	15,21 %	

Tabla 4.19: Resultados Comparación Cobertura BE vs VoLTE - Uplink

4.3.4.4. Análisis de resultados del 4to Set de Simulaciones

A partir de las simulaciones realizadas en el tercer set de simulaciones, se concluye que:

- El servicio VoLTE presenta una disminución de cobertura cercana al 15,4 % respecto a la red de datos cuando se consira ambas bandas (2600 y 700 MHz), al considerar desvanecimiento lento para el RSRP de corte.

4.4. Análisis General de los Resultados de Simulaciones

En las secciones anteriores se realizaron cuatro sets de simulaciones, con sus respectivas conclusiones. Sin embargo, es el análisis cruzado entre todas las simulaciones lo que entrega mayor información y una adecuada comprensión del impacto en cobertura de incorporar el servicio VoLTE sobre la red.

- Todas las simulaciones presentaron porcentajes de cobertura bajo lo esperado. Esto se debió a dos factores: El primero es que se utilizó un área mayor a la que se utiliza de forma común por Entel, es decir, se utilizó un área que sobrepasa en extensión al *Clutter* de Santiago, incorporando áreas que no poseen cobertura. El segundo factor es que se utilizó el RSRP de corte con *Fading Margin* en vez de utilizar el RSRP de corte puro (sin *fading margin* ni *penetration margin*), obteniendo un área de cobertura más bajo que el simulado con RSRP de corte puro, con el cual se obtiene porcentajes que rondan el 80 % de cobertura para datos.

Se aclara que el área utilizada para las simulaciones fue solicitada por el profesor a cargo de la memoria, perteneciente al área de NTA de Entel, en tanto que se utilizó el RSRP con *Fading Margin* para incorporar los efectos de mayores márgenes de *fading* que incorpora VoLTE versus la red de datos.

- En la banda 2600 MHz se pierde menos cobertura que en la banda 700 MHz (16,6 % contra un 25,5 % aproximado). Esto se explica mayormente por la diferencia de niveles de corte RSRP, pues en la banda de 2600 MHz existe una diferencia de 3,4 [dB] mientras que en la banda de 700 MHz existe una diferencia de 4,62 [dB] entre los niveles de corte RSRP de *Best Effort* y VoLTE. Dado que la propagación es mayor en la banda de 700 MHz, un decibel de diferencia se traduce en una mayor área de pérdida de cobertura.
- Se establece como causa principal a la pérdida de cobertura de la banda de 700 MHz, la mayor diferencia en el punto de corte RSRP que esta poseía en VoLTE en comparación al punto de corte RSRP de datos, y como causa secundaria, a la menor cantidad de antenas que Entel cuenta en la zona estudiada en comparación a la banda de 2600 MHz.
- Al analizar simultáneamente las bandas 2600 y 700 MHz el porcentaje de cobertura subió aproximadamente un 11,5 % para la red *Best Effort* y un 13 % para la red VoLTE.
- TTI Bundling ayuda a mejorar la cobertura VoLTE entre un 20 % y un 25 % para el área estudiada. De no incorporarse, las pérdidas estudiadas de cobertura se acrecentarían.

Además de los puntos anteriores, en el Anexo B se entrega los resultados de los sets de simulaciones 2, 3 y 4, realizados con RSRP de corte puro, es decir, sin considerar márgenes ni desvanecimiento LNF. **A partir de las simulaciones con RSRP de corte puro resumidas en el Anexo B, se puede concluir que:**

- El porcentaje de cobertura para la red de datos de Entel ronda el 75 % al considerar el área estudiada, para la banda de 2600 MHz, y se estima en un 85 % del área estudiada para la banda de 700 MHz.

- El porcentaje de cobertura para VoLTE se aproxima al 67% para la banda de 2600 MHz, en tanto que se aproxima al 71% para la banda de 700 MHz.
- La pérdida porcentual de área entre VoLTE y *Best Effort* es aproximadamente de 8% en la banda de 2600 MHz, y de un 13% en la banda de 700 MHz.
- Existe una diferencia aproximada del 15% al comparar el área de cobertura de la banda 2600 MHz sin incluir *fading*, y al considerarlo en el RSRP. En tanto que la diferencia se incrementa en la banda 700 MHz llegando a un 25% aproximadamente.
- Disminución aproximada de un 7.5% de cobertura para el servicio VoLTE en comparación a la cobertura del servicio de datos 4G, para la banda 2600 MHz, considerando RSRP de corte sin *fading*.
- Disminución aproximada de un 19% de cobertura para el servicio VoLTE en comparación a la cobertura del servicio de datos 4G, para la banda 700 MHz, considerando RSRP de corte sin *fading*.

Por último se enfatiza que las simulaciones resumidas en el Anexo B no fueron incluidas en el cuerpo del informe pues se priorizó las simulaciones en que se muestra el efecto del desvanecimiento por LNF, sin embargo estas ayudan a establecer el porcentaje de cobertura si no se considera *fading*, formato que es utilizado en simulaciones de Entel.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones para Entel

5.1. Conclusiones

El objetivo principal de esta memoria se cumplió mediante el diseño de *link budget* para estimar la cobertura que tendrá el servicio VoLTE para usuarios de la red 4G de Entel, en la ciudad de Santiago de Chile. Para ello se utilizaron datos reales de la red 4G LTE de Entel, los cuales fueron posteriormente cargados y simulados con el programa Mentum Planet (versión 5.7), obteniendo los porcentajes de pérdida asociados a la implementación del servicio VoLTE en comparación a la cobertura de la red de datos *Best Effort* 4G.

Se determinó pérdidas de trayecto (MAPL) para ambas bandas estudiadas, estableciendo que los puntos de corte calculados RSRP, sin considerar márgenes, son cercanos a los obtenidos en el *link budget* de datos de Entel. Se estableció una diferencia positiva de 0.18 [dB] para la banda de 2600 MHz y una diferencia negativa de 1.04 [dB] para la banda de 700 Mhz. Pese a lo anterior, mediante el set de simulaciones realizado, se corroboró que la cobertura de 4G LTE con servicio VoLTE es menor que la cobertura 4G de datos (*Best Effort*) que Entel posee actualmente, tanto para la banda de 2600 MHz como para la banda de 700 MHz, siendo esta última banda la más afectada por la pérdida de cobertura. Se relacionó como causa principal a la pérdida de cobertura de la banda de 700 MHz, la mayor diferencia en el punto de corte RSRP que esta poseía en VoLTE en comparación al punto de corte RSRP de datos, y como causa secundaria, a la menor cantidad de antenas que Entel cuenta en la zona estudiada en comparación a la banda de 2600 MHz.

Mediante el estudio realizado, y la posterior comprobación por medio de las simulaciones, se estableció la importancia de la implementación de *features* para mejorar la cobertura VoLTE, como es el caso de *TTI Bundling*, el cual se determinó que mejora la cobertura entre un 20 a un 25 % aproximadamente, para la zona estudiada.

Finalmente, el estudio y trabajo realizado en la presente memoria, permitió desarrollar y entregar a Entel el siguiente set de recomendaciones para la implementación del servicio

5.2. Recomendaciones para Entel

A continuación se listan recomendaciones que el alumno memorista otorga a Entel.

1. Recomendaciones de Features:

- Se recomienda la activación de los *features* ROHC y RLC UM Segmentation. Durante el trabajo de memoria se establece que ROHC es necesario para reducir el inmenso tamaño de las cabeceras IPv6, en tanto que RLC UM Segmentation permite la segmentación de paquetes de gran tamaño. Ambos *features* son requisitos del *feature* TTI Bundling, el cual es esencial para incrementar la cobertura.
- Se recomienda fuertemente la activación del *feature* TTI Bundling. En el presente trabajo de memoria se estableció, mediante simulaciones, que TTI Bundling mejora sustancialmente la cobertura para el enlace ascendente.
- Se recomienda la activación del *feature* Frequency Hopping. Según lo estudiado en el presente trabajo, este *feature* ayuda a reducir la interferencia en el borde de celda, ayudando a mejorar la cobertura.
- Únicamente se estudió los *features* nombrados anteriormente. Otros *features* deberán ser analizados de forma independiente por Entel.

2. Recomendaciones de Parámetros:

- Body Loss: En la comparación de *link budgets*, el consultor de Volte sugiere mayores pérdidas de cuerpo en la banda de 700 MHz, sin embargo, no se encontró estudios o *papers* que justificaran o sugirieran mayores pérdidas de cuerpo en bandas de frecuencias menores. En base a lo estudiado, se sugiere utilizar un valor de 3 [dB] como margen de pérdidas de cuerpo.
- SINR Objetivo: Se recomienda un estudio empírico y por *cluster* de este valor. Dadas las características dinámicas de la red, y la variabilidad de la interferencia según distintos sectores geográficos, tras la puesta en marcha de VoLTE se hará necesario un estudio empírico y posterior optimización de este valor a nivel de *clusters*.
- Otros Parámetros: Se sugiere utilizar los valores resumidos en las tablas 3.33 y 3.34, bajo la columna *Memoria*. Cada valor utilizado en el *link budget* ha sido estudiado y obtenido a partir de cálculos o de documentos oficiales, exclusivamente para la red de Entel estudiada, siendo estos los mejores valores a utilizar.

3. Recomendaciones de Simulaciones:

- Para futuras simulaciones por parte del área de redes de Entel, se recomienda a utilizar las configuraciones descritas en los puntos 4.2.2 y 4.3, donde se detalla los pasos y valores utilizados para realizar, de forma correcta, simulaciones con servicio VoLTE.
- Al periodo en que esta memoria se ha terminado de escribir, Entel ha comenzado a probar la nueva versión 6.2 de Mentum Planet. Ésta nueva versión, en comparación con la 5.7, incorpora nuevas simulaciones para VoLTE, como lo es el Seguimiento de Tráfico de Llamadas (*Traffic Maps and Call Tracer*), además de permitir un análisis más profundo sobre interferencias (mediante *Interference Matrix*), lo que permitiría establecer mejores valores para Interference Margin y SINR objetivos, dependiendo de cada zona geográfica puntual (*clusters*). Se recomienda la actualización del programa a la nueva versión 6.2 para permitir estudiar los puntos antes descritos con mayor precisión.

5.3. Trabajos Futuros

A continuación se enumeran posibles líneas de trabajo futuro que pueden aportar al desarrollo de la presente memoria.

1. Expansión del estudio realizado a otras redes, pudiendo variar operadores, bandas de frecuencias y áreas geográficas estudiadas.
2. Replicar el estudio realizado incorporando nuevos sistemas de simulaciones que permitan generar valores de SINR e *Interference Margin* por sectores geográficos, mejorando la precisión en el estudio de cobertura. Se recomienda incluir estudios de Interferencia.

Acrónimos

1G	First Generation of Wireless Telephone Technology
2G	Second Generation of Wireless Telephone Technology
3G	Third Generation of Wireless Telephone Technology
3GPP	3rd Generation Partnership Project
3GPP2	3rd Generation Partnership Project 2
4G	Fourth Generation of Wireless Telephone Technology
5G	Fifth Generation of Wireless Telephone Technology
ACK	Acknowledgement
AMPS	Advanced Mobile Phone Service
AMR	Adaptive Multi-Rate Audio
AMR-NB	Adaptive Multi-Rate Narrow Band audio codec
AMR-WB	Adaptive Multi-Rate Wide Band audio codec
AP	Access Point
AS	Access Stratum
BLER	Block Error Rate
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
BSC	Base Station Controller
CDMA	Code Division Multiple Access
CN	Core Network
CP	Cyclic Prefix

CPU	Central Processing Unit
CQI	Channel Quality Indicator
CRC	Cyclic Redundancy Check
CS	Circuit Switching
CSCF	Call Session Control Function
CSFB	Circuit Switching Fall Back
DFT	Discrete Fourier Transform
DRB	Data Radio Bearer
E-RAB	Evolved Radio Access Bearer
E-UTRA	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EGPRS	Enhanced GPRS
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
eNB	Evolved NodeB
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
EV-DO	Evolution Data Optimized
EVS	Enhanced Voice Services codec
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FER	Frame Error Rate
FH	Frequency Hopping
GBR	Guaranteed Bit Rate
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communication

GSM	GSM Association
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HRPD	CDMA-2000 High Rate Packet Data
HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
I-CSCF	Interrogating CSCF
IETF	Internet Engineering Task Force
IFFT	Inverse Fast Fourier Transformation
IMT-A	International Mobile Telecommunications Advanced Standard
IMS	IP Multimedia Subsystem
IOT	Internet Of Things
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
LNF	Log Normal Fading margin
LTE	Long Term Evolution
LTE+	Long Term Evolution Advanced
M2M	Machines To Machines
MAC	Media Access Control
MAPL	Maximum Allowable Path Loss
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIMO	Multiple Inputs Multiple Outputs
MISO	Multiple Inputs Single Output
MME	Mobility Management Entity
MOS	Mean Opinion Score
MSC	Mobile Switching Center

NAS	Non-Access Stratum
nGBR	non-Guaranteed Bit Rate
NACK	Negative Acknowledgement
NMT	Nordic Mobile Telephones
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OTT	Over The Top
P-GW	Public Data Network Gateway
P-CSCF	Proxy CSCF
P-SS	Primary SS
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
PCRF	Policy and Charging Rules Function
PCS	Personal Communication Systems
PDC	Pacific Digital Communications
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PDU	Protocol Data Units
PHICH	Physical HARQ Indicator Channel
PMCH	Physical Multicast Channel
PRACH	Physical Random Access Channel
PRB	Physical Resource Block
PS	Packet Switching
PSK	Phase Shift Keying

PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QCI	QoS Class Identifier
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RAN	Radio Access Network
RB	Radio Bearer
RCS	Rich Communications Services
RE	Resource Element
RF	Radio Frequency
RLC	Radio Link Control
RLC-UM	Radio Link Control Unacknowledged Mode
RNC	Radio Network Controller
ROHC	Robust Header Compression
RRC	Radio Resource Control
RS	Reference Signal
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTP	Real-Time Transport Protocol
S-CSCF	Serving CSCF
S-GW	Serving Gateway
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Divison Multiple Access
S-SS	Secondary SS
SIM	Subscriber Identity Module

SIMO	Single Input Multiple Outputs
SINR	Signal to Interference-plus-Noise Ratio
SIP	Session Initiation Protocol
SIR	Signal Interference Ratio
SISO	Single Input Single Output
SMS	Short Message Service
SMTP	Simple Mail Transfer Protocol
SNR	Signal Noise Ratio
SRB	Signalling Radio Bearer
SRVCC	Single Radio-Voice Call Continuity
SS	Synchronization Signal
TBS	Transport Block Size
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TTI	Transmission Time Interval
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UICC	Universal Integrated Circuit Card
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
ViLTE	Video over LTE
VoIP	Voice Over IP
VoLTE	Voice Over LTE
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiMAX2	Worldwide Interoperability for Microwave Access 2

Bibliografía

Libros

- [1] Ajay R. Mishra. *Cellular Technologies for Emerging Markets: 2G, 3G and Beyond*. John Wiley & Sons, 2010.
- [2] Christopher Cox. *An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications*. John Wiley & Sons, 2014.
- [3] Ramon Agusti Comes et al. *LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles*. Fundación Vodafone España, 2010.
- [56] Stefania Sesia et al. *LTE - The UMTS Long Term Evolution*. John Wiley & Sons, 2011.
- [67] Harri Holma and Antti Toskala. *LTE for UMTS*. John Wiley & Sons, 2011.
- [68] Ayman ElNashar et al. *Design, Deployment and Performance of 4G-LTE Networks*. John Wiley & Sons, 2014.
- [76] Amitabha Ghosh and Rapeepat Ratasuk. *Essentials of Lte and Lte-A*. CAMBRIDGE UNIV PR, 2011.

Papers

- [63] Elias Jailani et al. “LTE speech traffic estimation for network dimensioning”. In: *Wireless Technology and Applications (ISWTA), 2012 IEEE Symposium on*. IEEE. 2012, pp. 315–320.
- [70] Jing Han and Haiming Wang. “Principle and performance of TTI bundling for VoIP in LTE FDD mode”. In: *Wireless Communications and Networking Conference, 2009. WCNC 2009. IEEE*. IEEE. 2009, pp. 1–6.
- [71] Riikka Susitaival and Michael Meyer. “LTE coverage improvement by TTI bundling”. In: *Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th*. IEEE. 2009, pp. 1–5.
- [72] Danish A Khan and Basuki E Priyanto. “Performance evaluation of frequency hopping schemes in UTRA-ITE uplink”. In: *Student Paper, 2008 Annual IEEE Conference*. IEEE. 2008, pp. 1–5.
- [75] J Salo et al. “Practical introduction to LTE radio planning”. In: *A white paper on basics of radio planning for 3GPP LTE in interference limited and coverage limited*

Documentos Técnicos 3GPP

- [4] 3GPP TR 36.913. *Requirements for further advancements for E-UTRA (LTE-Advanced)*. version 12.0.0. 2014. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.913/36913-c00.zip.
- [6] 3GPP TS 23.002. *Network architecture*. version 12.7.0. 2015. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.002/23002-c70.zip.
- [7] 3GPP TS 36.401. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Architecture description*. version 12.3.0. 2015. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.401/36401-c30.zip.
- [8] 3GPP TS 36.101. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception*. version 12.14.1. 2017. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.101/36101-ce1.zip.
- [9] 3GPP TS 36.104. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception*. version 12.12.0. 2017. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.104/36104-cc0.zip.
- [10] 3GPP TS 36.300. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2*. version 12.10.0. 2016. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.300/36300-ca0.zip.
- [11] 3GPP TS 36.201. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE physical layer; General description*. version 12.2.0. 2015. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.201/36201-c20.zip.
- [12] 3GPP TS 36.211. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation*. version 12.9.0. 2017. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.211/36211-c90.zip.
- [13] 3GPP TS 36.212. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding*. version 12.8.0. 2016. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.212/36212-c80.zip.
- [14] 3GPP TS 36.213. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures*. version 12.11.0. 2016. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.213/36213-cb0.zip.
- [15] 3GPP TS 36.214. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer; Measurements*. version 12.3.0. 2016. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.214/36214-c30.zip.
- [16] 3GPP TS 36.302. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Services provided by the physical layer*. version 12.8.0. 2016. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.302/36302-c80.zip.
- [17] 3GPP TS 36.304. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) procedures in idle mode*. version 12.8.0. 2016. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.304/36304-c80.zip.

- [18] 3GPP TS 36.305. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Stage 2 functional specification of User Equipment (UE) positioning in E-UTRAN.* version 12.2.0. 2015. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.305/36305-c20.zip.
- [19] 3GPP TS 36.306. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio access capabilities.* version 12.11.0. 2016. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.306/36306-cb0.zip.
- [20] 3GPP TS 36.307. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements on User Equipments (UEs) supporting a release-independent frequency band.* version 12.14.0. 2017. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.307/36307-ce0.zip.
- [21] 3GPP TS 36.314. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Layer 2 - Measurements.* version 12.0.0. 2014. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.314/36314-c00.zip.
- [22] 3GPP TS 36.321. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification.* version 12.9.0. 2016. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.321/36321-c90.zip.
- [23] 3GPP TS 36.322. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Link Control (RLC) protocol specification.* version 12.4.0. 2016. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.322/36322-c40.zip.
- [24] 3GPP TS 36.323. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification.* version 12.6.0. 2016. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.323/36323-c60.zip.
- [25] 3GPP TS 36.331. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification.* version 12.12.0. 2017. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.331/36331-cc0.zip.
- [26] 3GPP TS 36.410. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); S1 general aspects and principles.* version 12.1.0. 2014. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.410/36410-c10.zip.
- [27] 3GPP TS 36.411. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); S1 layer 1.* version 12.0.0. 2014. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.411/36411-c00.zip.
- [28] 3GPP TS 36.412. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); S1 signalling transport.* version 12.0.0. 2014. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.412/36412-c00.zip.
- [29] 3GPP TS 36.413. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); S1 Application Protocol (S1AP).* version 12.7.0. 2016. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.413/36413-c70.zip.
- [30] 3GPP TS 36.414. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); S1 data transport.* version 12.1.0. 2014. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.414/36414-c10.zip.
- [31] 3GPP TS 24.301. *Non-Access-Stratum (NAS) protocol for Evolved Packet System (EPS); Stage 3.* version 12.13.0. 2016. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/24_series/24.301/24301-cd0.zip.
- [32] 3GPP TS 36.420. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); X2 general aspects and principles.* version 12.1.0. 2014. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.420/36420-c10.zip.

- [33] 3GPP TS 36.421. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); X2 layer 1*. version 12.0.0. 2014. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.421/36421-c00.zip.
- [34] 3GPP TS 36.422. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); X2 signalling transport*. version 12.0.0. 2014. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.422/36422-c00.zip.
- [35] 3GPP TS 36.423. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); X2 Application Protocol (X2AP)*. version 12.9.0. 2016. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.423/36423-c90.zip.
- [36] 3GPP TS 36.424. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); X2 data transport*. version 12.2.0. 2015. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.424/36424-c20.zip.
- [37] 3GPP TS 36.425. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); X2 interface user plane protocol*. version 12.1.0. 2015. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.425/36425-c10.zip.
- [38] 3GPP TS 23.401. *General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access*. version 12.11.0. 2016. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.401/23401-cb0.zip.
- [39] 3GPP TS 23.008. *Organization of subscriber data*. version 12.11.0. 2016. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.008/23008-cb0.zip.
- [40] 3GPP TS 23.203. *Policy and charging control architecture*. version 12.11.0. 2015. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.203/23203-cb0.zip.
- [41] 3GPP TS 29.274. *3GPP Evolved Packet System (EPS); Evolved General Packet Radio Service (GPRS) Tunnelling Protocol for Control plane (GTPv2-C); Stage 3*. version 12.13.0. 2016. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/29_series/29.274/29274-cd0.zip.
- [42] 3GPP TS 29.281. *General Packet Radio System (GPRS) Tunnelling Protocol User Plane (GTPv1-U)*. version 12.1.0. 2015. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/29_series/29.281/29281-c10.zip.
- [43] 3GPP TS 29.275. *Proxy Mobile IPv6 (PMIPv6) based Mobility and Tunnelling protocols; Stage 3*. version 12.7.0. 2015. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/29_series/29.275/29275-c70.zip.
- [44] 3GPP TS 29.272. *Evolved Packet System (EPS); Mobility Management Entity (MME) and Serving GPRS Support Node (SGSN) related interfaces based on Diameter protocol*. version 12.10.0. 2016. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/29_series/29.272/29272-ca0.zip.
- [45] 3GPP TS 29.061. *Interworking between the Public Land Mobile Network (PLMN) supporting packet based services and Packet Data Networks (PDN)*. version 12.12.0. 2016. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/29_series/29.061/29061-cc0.zip.
- [46] 3GPP TS 29.212. *Policy and Charging Control (PCC); Reference points*. version 12.13.0. 2016. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/29_series/29.212/29212-cd0.zip.
- [47] 3GPP TS 23.228. *IP Multimedia Subsystem (IMS); Stage 2*. version 12.10.0. 2016. URL: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.228/23228-ca0.zip.

- [52] 3GPP TS 24.229. *IP multimedia call control protocol based on Session Initiation Protocol (SIP) and Session Description Protocol (SDP); Stage 3*. version 12.16.0. 2017. URL: http://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/24_series/24.229/24229-cg0.zip.
- [53] 3GPP TS 26.235. *Packet switched conversational multimedia applications; Default codecs*. version 12.0.0. 2014. URL: http://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/26_series/26.235/26235-c00.zip.
- [54] 3GPP TS 26.441. *Codec for Enhanced Voice Services (EVS); General overview*. version 14.0.0. 2017. URL: http://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/26_series/26.441/26441-e00.zip.
- [59] 3GPP TS 26.071. *Mandatory speech CODEC speech processing functions; AMR speech Codec; General description*. version 12.0.0. 2014. URL: http://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/26_series/26.071/26071-c00.zip.
- [60] 3GPP TS 26.171. *Speech codec speech processing functions; Adaptive Multi-Rate - Wideband (AMR-WB) speech codec; General description*. version 12.0.0. 2014. URL: http://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/26_series/26.171/26171-c00.zip.
- [69] 3GPP TR 36.824. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE coverage enhancements*. version 11.0.0. 2012. URL: http://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/36_series/36.824/36824-b00.zip.
- [73] 3GPP TR 36.942. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios*. version 11.0.0. 2012. URL: http://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/36_series/36.942/36942-b00.zip.

Documentos GSMA e IETF

- [48] GSMA IR.92. *IMS Profile for Voice and SMS*. version 10.0. 2016. URL: <http://www.gsma.com/newsroom/wp-content/uploads/IR.92-v10.0.pdf>.
- [49] GSMA IR.94. *IMS Profile for Conversational Video Service*. version 11.0. 2016. URL: <http://www.gsma.com/newsroom/wp-content/uploads/IR.94-v11.0.pdf>.
- [50] J Rosenberg et al. *RFC 3261: SIP: Session initiation protocol*. 2002. URL: www.ietf.org/rfc/rfc3261.txt.
- [51] M Garcia-Martin et al. *RFC 3455: Private Header (P-Header) Extensions to SIP for the 3rd-Generation Partnership Project (3GPP)*. 2003. URL: www.ietf.org/rfc/rfc3455.txt.
- [55] GSM Association and others. *VoLTE Service Description and Implementation Guidelines*. version 2.0. 2014. URL: <http://www.gsma.com/network2020/wp-content/uploads/2014/10/FCM.01-VoLTE-Service-Description-and-Implementation-Guidelines-Version-2.0.pdf>.

Documentos Internos de Entel (Restringidos)

- [62] Ericsson. *VoIP Dimensioning FDD, Recommendation*. 2011.
- [65] Ericsson. *Antenna Integrated Radio Unit Description - AIR Description*. 2014.

Otras Referencias

- [5] Rohde & Schwarz. *5G Fundamentals*. Ed. by R&S. 2016. URL: http://www.rohde-schwarz.com/uk/wireless-communications/5g/5g-fundamentals/5g-fundamentals_229439.html.
- [57] Andreas Roessler. *Understanding PUSCH Frequency Hopping LTE*. Ed. by Rohde & Schwarz. 2010. URL: <https://www.wirelessdesignmag.com/blog/2010/12/understanding-pusch-frequency-hopping-lte>.
- [58] Handbook LTE. *Handbook LTE Frequency Hopping PUSCH*. Ed. by Sharetechnote.com. 2011. URL: http://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_FrequencyHopping_PUSCH.html.
- [61] Nokia. *Voice over LTE (VoLTE) Optimization*. Ed. by Nokia Solutions and Networks. 2015. URL: <https://resources.ext.nokia.com/asset/200303>.
- [64] Don. *How Big is a Voice Call?* Ed. by LTE university. 2013. URL: http://lteuniversity.com/get_trained/expert_opinion1/b/donhanley/archive/2013/09/11/how-big-is-a-voice-call.aspx.
- [66] Teletopix.org. *Calculation For Body Loss And Feeder Loss For LTE*. Ed. by Telecom Techniques Guide. 2013. URL: <http://www.teletopix.org/4g-lte/calculation-for-body-loss-and-feeder-loss-for-lte/>.
- [74] Mauricio La Rocca. *RSRQ to SINR Relation*. Ed. by Laroccasolutions. 2016. URL: <http://www.laroccasolutions.com/164-rsrq-to-sinr/>.
- [77] InfoVista. *Mentum Planet Live RF planning and optimization*. 2017. URL: <http://www.fovista.com/products/Mentum-Planet-Live-RF-planning-and-optimization>.
- [78] Marceau Coupechoux. *Link Budget 4G*. Ed. by Institut Mines-Télécom. 2016. URL: <http://perso.telecom-paristech.fr/~coupecho/cours/BdL-4G-eng.pptx.pdf>.

ANEXOS

ANEXO A: Modelos de Propagación

Modelo Okumura-Hata

Este modelo se basa en los datos de pérdidas por propagación obtenidos por Okumura, y es válido en el rango de frecuencias de 150 MHz a 1500 MHz. El modelo incorpora la información gráfica del modelo de Okumura y lo desarrolla para realizar los efectos de difracción, reflexión y dispersión causados por las estructuras de la ciudad. Adicionalmente, el Modelo Okumura-Hata aplica correcciones para aplicaciones en ambientes suburbanos y rurales.

En este modelo la altura de la antena debe estar en el rango de 30 a 200 metros y la altura de la antena receptora entre 1 a 10 metros.

De [78] se extrajo las fórmulas presentadas a continuación.

$$L = A + B \log_{10} R - C$$

$$\begin{aligned} A &= 69.55 + 26.16 \log_{10} f - 13.82 \log_{10} h_b \\ B &= 44.9 - 6.55 \log_{10} h_b \\ C &= \begin{cases} 3.2(\log_{10}(11, 75f))^2 - 4.97 & \text{(Urban)} \\ 2(\log_{10}(f/28))^2 + 5.4 & \text{(Suburban)} \\ 4.78(\log_{10} f)^2 - 18.33 \log_{10} f + 40.94 & \text{(Rural)} \end{cases} \end{aligned}$$

Con f la frecuencia central de operación (en Hz), R el radio de cobertura (en metros), y h_b la altura (en metros) de la radio base.

Modelo Cost231-Hata

El modelo Cost231-Hata es un modelo semi-empírico de predicción de las pérdidas en un trayecto, que extiende al modelo Hata. El modelo opera en el rango de frecuencia de 1500 a 2000 MHz.

De forma análoga al modelo anterior, a partir del documento [78] se extrajo la fórmula para sectores urbanos y semi-urbanos, la cual se presenta a continuación.

$$L = A + B \log_{10} R - C$$

$$A = 46.3 + 33.9 \log_{10} f - 13.82 \log_{10} h_b$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log_{10} h_b$$

$$C = (1.1 \log_{10} f - 0.7)h_m - (1.56 \log_{10} f - 0.8) - 3$$

Con f la frecuencia central de operación (en Hz), R el radio de cobertura (en metros), h_b la altura (en metros) de la radio base, y h_m la altura (en metros) del móvil.

ANEXO B: Resumen Simulaciones con RSRP puro (sin márgenes)

Se complementa el trabajo realizado en el capítulo cuatro con los resultados de los sets 2 y 3 de simulaciones (secciones 4.3.2 y 4.3.3) replicados con los valores de RSRP de corte mostrados en la tabla 3.32. Se omiten de forma intencional las imágenes obtenidas de las simulaciones para evitar la extensión del documento.

En la tabla 5.1, se aprecia los valores de cobertura obtenidos si no se considera el desvanecimiento (LNF).

RESUMEN SIMULACIONES	RSRP SIN FADING		RSRP CON FADING	
	AREA (km2)	Porcentaje (%)	AREA (km2)	Porcentaje (%)
	Cobertura	Cobertura	Cobertura	Cobertura
BE 2600 DL	519,67	73,83	418,96	59,52
VoLTE 2600 DL	447,96	63,64	346,59	49,24
BE 2600 UL	531,33	75,48	419,42	59,58
VoLTE 2600 UL	498,07	70,76	352,31	50,05
BE 700 DL	587,97	83,53	424,74	60,34
VoLTE 700 DL	456,95	64,92	314,37	44,66
BE 700 UL	611,15	86,82	425,89	60,50
VoLTE 700 UL	463,52	65,85	318,89	45,30
Área Total (km2)	703,92			

Tabla 5.1: Resumen de Simulaciones SIN y CON considerar el margen de LNF