

# Tabla de Contenido

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1. Presentación</b>	<b>2</b>
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
<b>2. Antecedentes</b>	<b>6</b>
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
<b>3.</b>	<b>Metodología</b>	<b>56</b>
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
<b>4.</b>	<b>Simulaciones</b>	<b>88</b>
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
<b>5. Conclusiones y Recomendaciones para Entel</b>	<b>113</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	113
5.2. Recomendaciones para Entel . . . . .	114
5.3. Trabajos Futuros . . . . .	115
<b>Acrónimos</b>	<b>116</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>122</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>128</b>
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