



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Metodología para evaluar el  
funcionamiento de un sitio de LTE  
en etapa de pre lanzado**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniera en Telecomunicaciones**

**P R E S E N T A**

Daniela Berenice Reyes Badillo

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. José María Matías Maruri



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018**



## Resumen

Debido a que hoy en día el uso de celulares ha crecido y su demanda aumenta, las empresas de telecomunicaciones deben de estar a la vanguardia para proveer servicios de calidad a cada usuario que se integra. Para ello, se han desarrollado distintas tecnologías, que con el paso del tiempo han corregido y mejorado la experiencia de cada usuario. En México se tiene ese desarrollo y operadoras como Movistar, Telcel y AT&T ya se encuentran trabajando con redes LTE.

Para construir un sitio que opere con la tecnología de LTE primero se tiene una etapa de diseño, una vez implementado físicamente, será necesario verificar antes de activarlo de manera comercial para los usuarios. La propuesta de esta tesis consiste precisamente en una metodología de verificación del desempeño de un sitio de LTE. Esta metodología fue basada en las características técnicas que la 3GPP y la UIT exigen como mínimo para considerar que una radio base opera adecuadamente bajo esta tecnología. Además se consideraron otros procedimientos de verificación propuestos por otros autores, así como la experiencia en el área de radiofrecuencia adquirida en Ericsson México.

La metodología consta de tres etapas: verificación de tasa de transmisión de datos, verificación de cobertura y verificación de la calidad de servicio mediante KPIs (indicadores de desempeño). También se propuso el equipo necesario para implementar la metodología, que se compone principalmente de un equipo de cómputo, de un equipo de usuario o celular, de un scanner, un GPS y un vehículo móvil. Existe también software especializado para cada etapa de la metodología dependiendo lo que se desee verificar: programas dedicados al diseño del área de cobertura; a la optimización del sitio de LTE; al diseño de recorridos y a la medición de tasa de transferencia de datos.

En las conclusiones se manifiesta, con los análisis realizados en capítulos anteriores, si la metodología cumple con el objetivo de servir como guía para la recolección de información clave que permite saber si el funcionamiento de un sitio LTE es adecuado o no en base a las características que exige la 3GPP.

Al final de la tesis se agregaron dos anexos para ayudar al lector a familiarizarse con el tema: el A explica de manera general conceptos básicos de redes celulares y en el anexo B se explican las características propias de LTE.

# Contenido

<b>RESUMEN</b> .....	<b>II</b>
<b>CONTENIDO</b> .....	<b>III</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>VII</b>
<b>LISTA DE ACRÓNIMOS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 TEMA DE PROYECTO DE TESIS.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.3 OBJETIVO.....	2
1.4 METODOLOGÍA.....	2
1.5 ALCANCES.....	3
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>4</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>4</b>
2.1 ¿CÓMO SURGE LA TECNOLOGÍA LTE?.....	4
2.2 REQUERIMIENTOS TÉCNICOS PARA UN SITIO LTE.....	5
2.3 PRIMERAS METODOLOGÍAS DE SITIOS LTE.....	7
2.4 ETAPAS DE PREPARACIÓN DE UN SITIO DE LTE.....	11
2.5 ELEMENTOS QUE COMPONEN A UNA RADIO BASE DE LTE PARA SU CONSTRUCCIÓN.....	11
2.6 METODOLOGÍAS EN ETAPA DE PRE LANZADO DE SITIOS LTE.....	14
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>16</b>
<b>DESARROLLO DE METODOLOGÍA PARA VERIFICAR EL FUNCIONAMIENTO DE UN SITIO LTE EN ETAPA DE PRE LANZADO</b> .....	<b>16</b>
3.1 HIPÓTESIS PARA DESARROLLO DE METODOLOGÍA EN ETAPA DE PRE LANZADO DE SITIOS LTE.....	16
3.2 PROPUESTA DE EQUIPO Y SOFTWARE DE TECNOLOGÍA DE LTE PARA LA MEDICIÓN Y TOMA DE MUESTRAS.....	17
3.3 MODELO DE CALIBRACIÓN PARA PREDICCIÓN DE COBERTURA DE UN SITIO DE LTE.....	21
3.4 PRIMERA ETAPA DE LA METODOLOGÍA: VERIFICACIÓN DE COBERTURA DEL SITIO DE LTE.....	22
3.5 ANÁLISIS DE LAS CAUSAS DE BAJA POTENCIA Y PROPUESTAS DE CORRECCIÓN.....	31
3.6 SEGUNDA ETAPA DE LA METODOLOGÍA: VERIFICACIÓN DE LA TASA DE TRANSMISIÓN DE DATOS DE BAJADA Y DE SUBIDA ..	39
3.7 TERCERA ETAPA DE LA METODOLOGÍA: VERIFICAR LA CALIDAD DE SERVICIO CON KPIS.....	44
3.8 PROPUESTA FINAL DE METODOLOGÍA PARA VERIFICACIÓN DE UN SITIO DE LTE EN ETAPA DE PRE LANZADO.....	52
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>55</b>
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>55</b>
<b>ANEXO A</b> .....	<b>58</b>
<b>FUNDAMENTOS DE LOS SISTEMAS CELULARES</b> .....	<b>58</b>
A.1 FACTOR DE REÚSO.....	58
A.2 RELACIÓN SEÑAL A RUIDO EN UN SISTEMA CELULAR.....	62
A.3 ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS.....	67
A.4 PROCESO DE <i>HANDOVER</i> .....	67
A.5 ESTRATEGIAS DE AUMENTO DE CAPACIDAD Y COBERTURA.....	68

A.6 TRÁFICO EN UN SISTEMA CELULAR .....	70
A.7 MODELOS DE PROPAGACIÓN EN LAS REDES INALÁMBRICAS .....	73
A.8 PROBABILIDAD DE LA SEÑAL EN PARTES ESPECÍFICAS DE UNA CELDA .....	77
<b>ANEXO B .....</b>	<b>79</b>
<b>CARACTERÍSTICAS DE LTE.....</b>	<b>79</b>
B.1 ARQUITECTURA (EPC Y EUTRAN) .....	80
B.2 FUNCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS QUE CONFORMAN LTE/SAE.....	81
B.3 RED BACKHAUL LTE .....	82
B.4 SERVICIO DE VOZ EN LTE .....	83
B.5 MODELO DE PROPAGACIÓN DE LTE .....	85
B.6 PLANO DE CONTROL Y DEL USUARIO .....	91
B.7 MODELO OSI Y PROTOCOLOS DE LTE.....	92
B.8 CANALES LÓGICOS, DE TRANSPORTE Y FÍSICOS .....	97
B.9 ANCHO DE BANDA Y FRECUENCIAS DE OPERACIÓN .....	100
B.10 TÉCNICA DE ACCESO Y MODULACIÓN .....	106
B.11 TECNOLOGÍA MIMO .....	107
B.12 TASA DE TRANSMISIÓN DE DATOS DE BAJADA Y DE SUBIDA .....	108
B.13 CODIFICACIÓN .....	109
B.14 INTERFACE AÉREA LTE.....	109
B.15 SEÑALES DE REFERENCIA .....	111
B.16 IDENTIFICADOR DE LA CELDA EN LTE (PCI) .....	111
B.17 INFORMACIÓN DEL SITIO .....	112
B.18 MOVILIDAD.....	113
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>117</b>

## Índice de figuras

<b>FIGURA 1.1</b> CRECIMIENTO DE REDES COMERCIALES DE LTE LANZADAS POR AÑO A NIVEL MUNDIAL.....	2
<b>FIGURA 2.1</b> DIFERENTES CONFIGURACIONES EN LA INFRAESTRUCTURA DE UN SITIO DE LTE.....	12
<b>FIGURA 2.2</b> COMPONENTES DE UNA RADIO BASE DE LTE. ....	13
<b>FIGURA 3.1</b> PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA VERIFICAR EL FUNCIONAMIENTO DE UN SITIO DE LTE. ....	17
<b>FIGURA 3.2</b> EQUIPOS MÓVILES PROPUESTOS PARA LA METODOLOGÍA. ....	18
<b>FIGURA 3.3</b> EQUIPOS SCANNER DISPONIBLES EN EL MERCADO PARA LA METODOLOGÍA. ....	18
<b>FIGURA 3.4</b> CONEXIÓN DE LOS DISPOSITIVOS NECESARIOS PARA LLEVAR A CABO UN DRIVE TEST. ....	19
<b>FIGURA 3.5</b> EJEMPLO DE MAPA DE RSRP CON SCANNER PCTEL. ....	23
<b>FIGURA 3.6</b> EJEMPLO DE MAPA DE RSRQ. ....	24
<b>FIGURA 3.7</b> EJEMPLO DE MAPA DE PCIS CON SCANNER PCTEL. ....	24
<b>FIGURA 3.8</b> EJEMPLO DE SITIO PARA LA CREACIÓN DE UNA RUTA. ....	26
<b>FIGURA 3.9</b> PASO 2 DE LA CREACIÓN DE UNA RUTA: ESTABLECIMIENTO DE LÍMITES. ....	27
<b>FIGURA 3.10</b> PASO 3 DE LA CREACIÓN DE UNA RUTA: CÍRCULOS CONCÉNTRICOS.....	28
<b>FIGURA 3.11</b> PASO 4 DE LA CREACIÓN DE UNA RUTA: CALLES DE MAYOR TRÁFICO.....	29
<b>FIGURA 3.12</b> PASO 5 DE LA CREACIÓN DE UNA RUTA: LUGARES DE MAYOR CONCENTRACIÓN DE USUARIOS. ....	30
<b>FIGURA 3.13</b> FIBRA ÓPTICA LIMPIA Y CONTAMINADA. ....	32
<b>FIGURA 3.14</b> EFECTOS DE LA FIBRA ÓPTICA CONTAMINADA. ....	33
<b>FIGURA 3.15</b> CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE ANTENA 742236V01.....	35
<b>FIGURA 3.16</b> CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE ANTENA SBNHH-1D65B.....	36
<b>FIGURA 3.17</b> AJUSTE DE ÁREAS DE DOMINIO. ....	37
<b>FIGURA 3.18</b> MODIFICACIÓN DE PATRONES DE RADIACIÓN CON TILT MECÁNICO.....	37
<b>FIGURA 3.19</b> MODIFICACIÓN DE PATRONES DE RADIACIÓN CON TILT ELÉCTRICO. ....	38
<b>FIGURA 3.20</b> TILT TOTAL DE UNA ANTENA. ....	38
<b>FIGURA 3.21</b> TASA DE TRANSMISIÓN DE DATOS DE CAPA FÍSICA Y CAPA DE APLICACIÓN.....	39
<b>FIGURA 3.22</b> PROGRAMA TAMOSOFT PARA MEDIR LA TASA DE TRANSFERENCIA DE DATOS. ....	40
<b>FIGURA 3.23</b> PROGRAMA IPERF Y COMANDOS PARA MEDIR LA TASA DE TRANSFERENCIA DE DATOS UDP.....	41
<b>FIGURA 3.24</b> MAPA DE LAS VELOCIDADES MÁXIMAS PERMITIDAS PARA LAS CALLES PRINCIPALES DE LA CIUDAD DE MÉXICO. ....	43
<b>FIGURA 3.25</b> EVENTOS DE INTENTO Y ÉXITO DURANTE EL PROCEDIMIENTO DE ACCESIBILIDAD EN LTE.....	45
<b>FIGURA 3.26</b> PROCESO DE LIBERACIÓN DE E-RABS. ....	47
<b>FIGURA 3.27</b> PROCESO DE LIBERACIÓN DEL EQUIPO DE ERABS Y EQUIPO DE USUARIO DE LA CELDA. ....	47
<b>FIGURA 3.28</b> COMANDO PING CUANDO RESPONDE. ....	48
<b>FIGURA 3.29</b> COMANDO PING CUANDO NO RESPONDE. ....	48
<b>FIGURA 3.30</b> PROCESO DE HANDOVER ENTRE SECTORES DE UN MISMO SITIO DE LTE.....	50
<b>FIGURA 3.31</b> PROCESO DE HANDOVER ENTRE DOS SITIOS DE LTE. ....	50
<b>FIGURA A.1</b> EJEMPLO DE UN CLÚSTER CON FACTOR DE REÚSO 3.....	59
<b>FIGURA A.2</b> EJEMPLO DE UN CLÚSTER CON FACTOR DE REÚSO 7.....	59
<b>FIGURA A.3</b> HEXÁGONO QUE REPRESENTA LA COBERTURA DE UNA CELDA. ....	60
<b>FIGURA A.4</b> DISTANCIA ENTRE SITIOS PARA UN CLÚSTER DE FACTOR DE REÚSO 3. ....	61
<b>FIGURA A.5</b> DISTANCIA ENTRE SITIOS PARA UN CLÚSTER DE FACTOR DE REÚSO 4. ....	61
<b>FIGURA A.6</b> REÚSO DE FRECUENCIAS PARCIAL.....	62
<b>FIGURA A.7</b> SEÑALES DE INTERFERENCIA PARA UN SITIO DE CLÚSTER FACTOR DE REÚSO 7. ....	63
<b>FIGURA A.8</b> FÓRMULA DE LEE DE INTERFERENCIA CO-CANAL.....	65
<b>FIGURA A.9</b> SEGUNDA FÓRMULA DE LEE DE INTERFERENCIA CO-CANAL. ....	66
<b>FIGURA A.10</b> MÉTODO DE DIVISIÓN CELULAR PARA AUMENTAR LA CAPACIDAD. ....	68
<b>FIGURA A.11</b> MÉTODO DE SECTORIZACIÓN PARA AUMENTAR LA CAPACIDAD.....	69
<b>FIGURA A.12</b> MÉTODO DE SECTORIZACIÓN PARA UN CLÚSTER DE FACTOR DE REÚSO 7. ....	69
<b>FIGURA A.13</b> COMPORTAMIENTO DEL CANAL INALÁMBRICO. ....	74
<b>FIGURA A.14</b> GEOMETRÍA DEL EFECTO DOPPLER.....	76
<b>FIGURA B.1</b> ARQUITECTURA DE LA TECNOLOGÍA LTE.....	80

<b>FIGURA B.2</b> RED BACKHAUL LTE.....	82
<b>FIGURA B.3</b> ARQUITECTURA CSFB DE LTE.....	83
<b>FIGURA B.4</b> ARQUITECTURA IMS.....	84
<b>FIGURA B.5</b> MODELO COST 231 WAFISH-IKEGAMI. ....	85
<b>FIGURA B.6</b> PROGRAMA ICS DESIGNER.....	90
<b>FIGURA B.7</b> PROGRAMA ATOLL RAN PLANNING. ....	90
<b>FIGURA B.8</b> PROGRAMA ASSET RADIO PLANNING. ....	91
<b>FIGURA B.9</b> MODELO EN CAPAS DE PLANO DE CONTROL DE CADA DISPOSITIVO DE UNA RED LTE.....	95
<b>FIGURA B.10</b> MODELO EN CAPAS DE PLANO DE USUARIO DE CADA DISPOSITIVO DE UNA RED LTE. ....	96
<b>FIGURA B.11</b> ESTABLECIMIENTO DE UN TÚNEL PARA COMENZAR EL PROCESO DE COMUNICACIÓN.....	97
<b>FIGURA B.12</b> CANALES UTILIZADOS EN EL ENLACE DE BAJADA. ....	98
<b>FIGURA B.13</b> CANALES UTILIZADOS EN EL ENLACE DE SUBIDA.....	98
<b>FIGURA B.14</b> MODO TDD. ....	100
<b>FIGURA B.15</b> MODO FDD. ....	101
<b>FIGURA B.16</b> UTILIZACIÓN DE MODULACIÓN ADAPTATIVA POR LTE. ....	106
<b>FIGURA B.17</b> INTERFACE AÉREA DE LTE PARA UN SÍMBOLO DE OFDMA. ....	110
<b>FIGURA B.18</b> INTERFACE AÉREA DE LTE PARA UN SÍMBOLO DE SC-FDMA. ....	110
<b>FIGURA B.19</b> ESTABLECIMIENTO DE UNA SESIÓN DE COMUNICACIÓN DE UN EQUIPO LTE. ....	114
<b>FIGURA B.20</b> PROCEDIMIENTO DE UN HANDOVER INTRA-LTE TIPO X2. ....	115

## Índice de tablas

<b>TABLA 2.1</b> METODOLOGÍA REALIZADA POR ERICSSON.....	8
<b>TABLA 2.2</b> METODOLOGÍA REALIZADA POR VODAFONE Y ALCATEL-LUCENT.....	9
<b>TABLA 2.3</b> METODOLOGÍA REALIZADA POR FUJITSU.....	10
<b>TABLA 2.4</b> METODOLOGÍA EN ETAPA DE PRE LANZADO DE UN SITIO LTE PROPUESTA POR HUAWEI.....	15
<b>TABLA 2.5</b> METODOLOGÍA EN ETAPA DE PRE LANZADO DE UN SITIO LTE PROPUESTA POR JDSU.....	15
<b>TABLA 3.1</b> MARCAS DE DISPOSITIVOS COMPATIBLES PARA REALIZAR PRUEBAS DE <i>DRIVE TEST</i> .....	20
<b>TABLA 3.2</b> TABLA DE RANGOS DE POTENCIA MANEJADOS EN LTE.....	22
<b>TABLA 3.3</b> TABLA DE RANGOS DE RSRQ MANEJADOS EN LTE.....	23
<b>TABLA 3.4</b> TABLA DE VALORES DE <i>LINK BUDGET</i> LTE.....	31
<b>TABLA 3.5</b> TABLA DE BANDAS DE FRECUENCIAS DE LTE EN MÉXICO.....	34
<b>TABLA 3.6</b> TABLA DE PROTOCOLOS DE TRANSPORTE Y SERVICIOS EN LOS QUE ESTÁN PRESENTES.....	41
<b>TABLA 3.7</b> TABLA DE VELOCIDADES DE UN RECEPTOR EN MOVIMIENTO SOPORTADAS POR LA TECNOLOGÍA LTE.....	42
<b>TABLA 3.8</b> TABLA DE PROBLEMAS DETECTADOS Y SOLUCIONES PARA LA ETAPA TRES DE LA METODOLOGÍA.....	51
<b>TABLA 3.9</b> METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL FUNCIONAMIENTO DE UN SITIO DE LTE EN ETAPA DE PRE LANZADO.....	54
<b>TABLA A.1</b> TABLA DE VALORES PARA EL EXPONENTE DE PÉRDIDA POR TRAYECTORIA.....	64
<b>TABLA A.2</b> TABLA DE VALORES SIR PARA FACTORES DE REÚSO 3, 4 Y 7.....	66
<b>TABLA A.3</b> TABLA DE VALORES SIR MÍNIMOS PARA DIFERENTES TECNOLOGÍAS.....	66
<b>TABLA A.4</b> TABLA DE DENSIDAD DE USUARIOS DEPENDIENDO LA REGIÓN.....	71
<b>TABLA A.5</b> TABLA DE ERLANGS B.....	72
<b>TABLA B.1</b> TABLA DE MODELOS DE PROPAGACIÓN DE LTE.....	86
<b>TABLA B.2</b> CLASIFICACIÓN DE MATRICES H DEPENDIENDO EL NÚMERO DE PUERTOS EN TRANSMISOR.....	87
<b>TABLA B.3</b> MODELOS DE CANAL DE LTE.....	88
<b>TABLA B.4</b> PERFILES DE LOS MODELOS DE CANAL DE LTE.....	88
<b>TABLA B.5</b> MODELOS DE CANAL Y FRECUENCIA DOPPLER DE LTE.....	89
<b>TABLA B.6</b> TABLA DE TIPOS DE PLANO PARA CADA INTERFAZ DE UNA RED LTE.....	92
<b>TABLA B.7</b> PROTOCOLOS DE LA CAPA DE RED EN LTE.....	93
<b>TABLA B.8</b> PROTOCOLOS DE LA CAPA DE ENLACE DE DATOS EN LTE.....	94
<b>TABLA B.9</b> CANALES LÓGICOS EN PLANO DE CONTROL Y PLANO DE USUARIO.....	99
<b>TABLA B.10</b> CANALES DE TRANSPORTE PARA SUBIDA Y BAJADA.....	99
<b>TABLA B.11</b> CANALES FÍSICOS PARA SUBIDA Y BAJADA.....	100
<b>TABLA B.12</b> BANDAS DE FRECUENCIAS EN MODO FDD DE LTE.....	102
<b>TABLA B.13</b> BANDAS DE OPERACIÓN DE LTE EN EL MODO TDD.....	103
<b>TABLA B.14</b> EARFCN DE BANDAS LTE.....	104
<b>TABLA B.15</b> EARFCN DE BANDAS LTE (CONTINUACIÓN).....	105
<b>TABLA B.16</b> CLASIFICACIÓN DE EQUIPOS DE USUARIO LTE EN CATEGORÍAS.....	108
<b>TABLA B.17</b> <i>RESOURCE BLOCKS</i> POR CADA ANCHO DE BANDA DE LTE.....	109
<b>TABLA B.18</b> FASES DE MOVILIDAD DE LTE.....	116

## Lista de acrónimos

3GPP	3rd Generation Partnership Project
AIR	Antenna Integrated Radio
ARQ	Automatic Repeat reQuest
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BCCH	Broadcast Control Channel
BCH	Broadcast Channel
BGCF	Breakout Gateway Control Functions
BER	Bit Error Rate
BPON	Broadband Passive Optical Network
CCCH	Common Control Channel
CDMA	Code División Múltiple Access
CMAS	Commercial Mobile Alert System
CPRI	Common Public Radio Interface
CQI	Channel Quality Indicator
CRC	Cyclic Redundancy Check
CS	Circuit Switch
CSCF	Call Session Control Function
CSFB	Circuit Switch Fall Back
DCA	Dynamic Channel Allocation
DCCH	Dedicated Control Channel
DL-SCH	Downlink Shared Channel
DRB	Data Radio Bearer
DRX	Discontinuous Reception
DSL	Digital Subscriber Line
DTCH	Dedicated Traffic Channel
DU	Digital Unit
EARFCN	EUTRA Absolute Radio Frequency Channel Number
EDGE	Enhanced Data rates for Global Evolution
eNB	evolved Node B
eNodeB	evolved Node B
EPA	Extended Pedestrian A
EPC	Evolved Packet Core
EPON	Ethernet Passive Optical Network
EPS	Evolved Packet System
E-RAB	E-UTRAN Radio Access Bearer
ETU	Extended Typical Urban
E-UTRA	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
EVA	Extended Vehicular A

FCA	Fixed Channel Allocation
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FL	Fluctuaciones Lentas
FR	Fluctuaciones Rápidas
FSAN	Full Service Access Network
GERAN	GSM EDGE Radio Access Network
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GPON	Gigabit Passive Optical Network
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSA	Global mobile Suppliers Association
GSM	Global System for Mobile communications
GTP-C	GPRS Tunneling Protocol Control
GTP-U	GPRS Tunneling Protocol User
HARQ	Hybrid Automatic Repeat reQuest
HNBIID	Home eNodeB Identifier
HPBW	Half-Power Beam Width
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
I-CSCF	Interrogating CSCF
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFHO	Inter Frequency Handover
IMS	IP Multimedia Subsystem
IP	Internet Protocol
IPERF	Internet Performance Working Group
IRAT	Inter Radio Access Technology
KPI	Key Performance Indicator
LLC	Logical Link Control
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service
MCCH	Multicast Control Channel
MCH	Multicast Channel
MGCF	Media Gateway Control Function
MGW	Media Gateway
MIB	Master Information Block
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output
MISO	Multiple-Input and Single-Output
MME	Mobility Management Entity
MPLS	MultiProtocol Label Switching

MTCH	Multicast Traffic Channel
NAS	Non Access Stratum
NGMN	Next Generation Mobile Networks
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OSI	Open System Interconnection
OTDR	Optical Time Domain Reflectometer
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PB3	Pedestrian B 3 km/h
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCCH	Paging Control Channel
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
PCH	Paging Channel
PCI	Physical Cell Identifier
P-CSCF	Proxy CSCF
PCRF	Policy and Charging Rules Function
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
P-GW	Packet Data Network Gateway
PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel
PMCH	Physical Multicast Channel
PRACH	Physical Random Access Channel
PS	Packet Switch
PSS	Primary Synchronization Signal
PUCCHI	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RACH	Random Access Channel
RAT	Radio Access Technology
RB	Resource Block
RE	Resource Element
RET	Remote Electrical Tilt
RLC	Radio Link Control
RMS	Root Mean Square
RNC	Radio Network Controller
ROE	Relación de Onda Estacionaria
RRC	Radio Resource Control
RRH	Remote Radio Head
RRU	Remote Radio Unit
RSRP	Reference Signal Received Power

RSRQ	Reference Signal Received Quality
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTT	Round Trip Time
RU	Radio Unit
S1AP	S1 Application Protocol
SAE	System Architecture Evolution
SC-FDMA	Single Carrier FDMA
S-CSCF	Serving CSCF
SCTP	Stream Control Transmission Protocol
SGSN	Serving GPRS Support Node
S-GW	Serving Gateway
SIB	System Information Blocks
SIM	Subscriber Identity Module
SIMO	Single-Input and Multiple-Output
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio
SIR	Signal-to-Interference-Ratio
SISO	Single-Input and Single-Output
SLF	Subscriber Location Function
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SRVCC	Single Radio Voice Call Continuity
SSS	Secondary Synchronization Signal
TA	Tracking Area
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
TDM	Time Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TMA	Tower Mounted Amplifier
TTI	Transmission Time Interval
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UIT	Unión Internacional de las Telecomunicaciones
UL-SCH	Uplink Shared Channel
UMTS	Universal Mobile Telecommunicatios System
UTRA	UMTS Terrestrial Radio Access
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VoLTE	Voice over LTE
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
X2AP	X2 Application Protocol



## Introducción

---

---

En este capítulo se menciona el tema de proyecto de tesis, el por qué de la elección del tema así como el objetivo de la tesis. Para cumplirlo, se exponen los métodos a seguir y por último, se explican los alcances que se conseguirán al concluir la tesis.

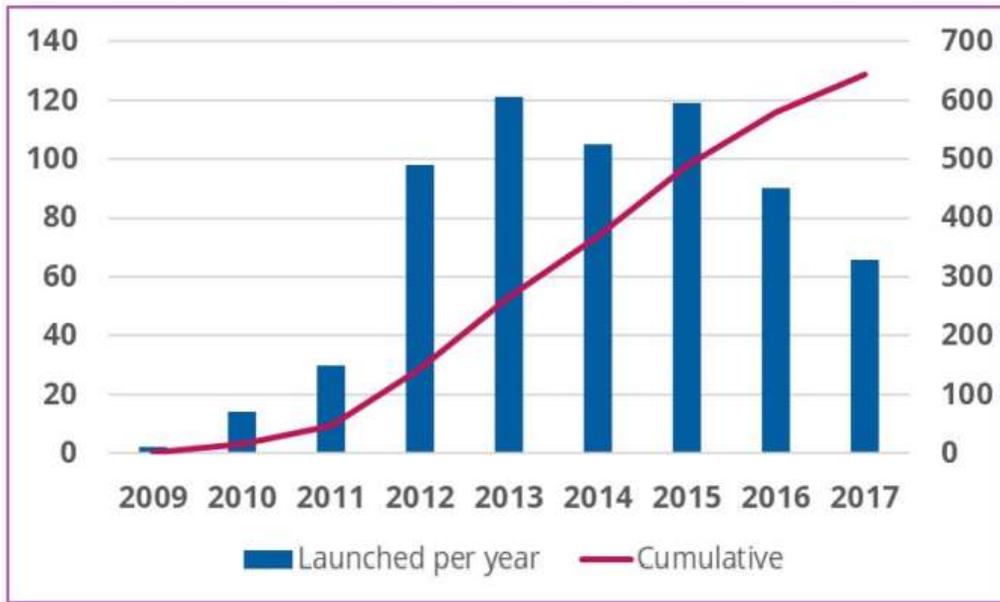
### 1.1 Tema de proyecto de tesis

Metodología para evaluar el funcionamiento de un sitio de LTE en etapa de pre lanzado.

### 1.2 Planteamiento del problema

Con base en la información de la GSA (*Global mobile Suppliers Association*) sobre el estudio de las tendencias de la tecnología de LTE, las primeras dos redes comerciales de LTE fueron lanzadas en el año 2009 (GSA, 2017a). En la figura 1.1 (GSA, 2017b) se muestra el crecimiento que ha tenido LTE cada año a nivel mundial: la gráfica de barras muestra el número de redes de LTE que se han lanzado por año mientras que la gráfica de línea muestra el total de redes comerciales lanzadas hasta el 9 de octubre del 2017, que han sido 644.

Las cifras anteriores demuestran que crecerá el número de usuarios de LTE, por lo que las operadoras se verán obligadas a lanzar más redes celulares, satisfaciendo al mismo tiempo la demanda de los clientes: tasa de transmisión de datos, cobertura, calidad, entre otros. Para lograrlo, habrá que desarrollar buenos procedimientos de diseño y optimización cuyos resultados se acerquen mucho a la experiencia que el usuario espera obtener del servicio de telecomunicaciones.



**Figura 1.1** Crecimiento de redes comerciales de LTE lanzadas por año a nivel mundial.

Fuente: [www.gsacom.com](http://www.gsacom.com)

El diseño de sitios de LTE basado únicamente en el uso de teorías sobre modelos de propagación no garantiza que se cumplan las expectativas esperadas, por lo que es necesario proponer un método que compruebe que dicho sitio ofrecerá servicios con las características consideradas como adecuadas a nivel real.

### 1.3 Objetivo

Desarrollar una metodología que sirva como guía en la recolección de información clave para mostrar los problemas presentes en el funcionamiento de un sitio de LTE en etapa de pre lanzado basándose en las características mínimas que debe cumplir, características establecidas por la 3GPP (3GPP, 25.912; 3GPP, 25.913).

### 1.4 Metodología

Con el fin de fundamentar las ideas que en esta tesis se sugieren, se hicieron investigaciones y análisis de documentos de la 3GPP y estudios realizados por otros autores. El orden que se llevó a cabo para tratar el tema fue:

1. Conocer los beneficios que ofrece LTE, los cuales establecieron los objetivos técnicos que se esperaron alcanzar con un buen funcionamiento del sitio.

2. Investigar las características y valores que la 3GPP estableció para considerar que un sitio realmente se desenvuelve bajo la tecnología LTE.
3. Investigar si con anterioridad se han realizado otras metodologías de verificación del funcionamiento de un sitio de LTE en etapa de pre lanzado, así como estudiar los resultados obtenidos de cada propuesta.
4. Se realizó una investigación sobre marcas de equipos y de software dedicados a medir y extraer información del sitio LTE para llevar a cabo la metodología.
5. Después de las investigaciones realizadas, se diseñó la metodología de acuerdo a los parámetros que exige la 3GPP y los rangos de valores en los que debería trabajar.
6. Finalmente, se hizo una comparación entre los requerimientos exigidos por la 3GPP y los aspectos que la metodología podría verificar para conocer el alcance de ella.

## **1.5 Alcances**

Obtener una metodología eficaz y práctica que pueda evaluar el desempeño de un sitio de LTE en etapa de pre lanzado. Se espera que con ella se identifiquen de manera clara los problemas de funcionamiento del sitio y, como consecuencia, proponer soluciones más acertadas a la situación.

En el aspecto académico, se espera que esta tesis proporcione un estudio completo y de fácil entendimiento sobre temas relacionados con la tecnología de LTE, además de proveer conocimiento sobre la implementación y mejoramiento del funcionamiento de un sitio a nivel real, derivado de un diseño que emplea teorías estudiadas en la carrera de Ingeniería de Telecomunicaciones de la UNAM.

## Marco teórico

---

---

En este capítulo se muestran las primeras metodologías desarrolladas por otros autores así como las propuestas que se tienen hoy en día para evaluar el funcionamiento de un sitio de LTE. Es recomendable estudiar con anterioridad el Anexo A para contar con los conocimientos básicos de sistemas celulares, y el Anexo B donde se explican las características principales de la tecnología LTE.

### 2.1 ¿Cómo surge la tecnología LTE?

Los servicios de telefonía celular surgieron con la idea de satisfacer la necesidad de comunicación inalámbrica y móvil. Con el paso del tiempo, además de lograr los servicios de voz, se ofrecieron servicios de datos como redes sociales, juegos en línea, videoconferencias y servicios MBMS, los cuales consisten en transmitir al mismo tiempo información desde un punto a diferentes equipos (como la televisión móvil).

La 3GPP fue creada en el mes de diciembre de 1998 para proveer especificaciones técnicas de GSM, sin embargo sus alcances han llegado a incluir tecnologías de acceso de radio avanzadas como GPRS y EDGE, así como la red de acceso radio terrestre UTRAN, utilizada en la tercera generación.

En el mes de septiembre del 2007, la 3GPP agregó otro proyecto a sus especificaciones: debido a que UTRAN tuvo un gran despliegue en todo el mundo, se deseaba mantener a futuro dicho proyecto, por lo que se trabajó en una nueva técnica de acceso conocida como E-UTRA. Dicha técnica de acceso, junto con las radio bases y los equipos celulares, forman la red E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Access Network*) o conocida comercialmente como LTE (*Long Term Evolution*). Su objetivo fue aumentar la capacidad de transmisión de datos en el enlace de subida y bajada así como la disminución de latencia (tiempo que tardan los paquetes en viajar a través de la red).

La 3GPP, además de técnicas de acceso, también participa en proyectos de red de núcleo que consisten en re-direccionar grandes cantidades de información a otras redes que se encuentran a grandes distancias de una forma rápida. En el año 2007 surgió SAE (*System Architecture Evolution*), una nueva red de núcleo de paquetes evolucionado basado en IP. Dicha red es conocida como EPC (*Evolved Packet Core*). La unión de la red de acceso E-UTRAN y la red de núcleo EPC forman el sistema EPS (*Evolved Packet System*) o LTE/SAE, términos que se utilizan de manera indistinta.

## 2.2 Requerimientos técnicos para un sitio LTE

Para que LTE fuera aceptada como una tecnología celular de cuarta generación (4G), la UIT fijó las características mínimas que debía cumplir. LTE no cumplió con todas ellas, por lo que se consideró que fuera una tecnología de generación 3.9 (3.9G), quedando *LTE-Advanced* como 4G debido al mejoramiento proporcionado en la tasa de transmisión de datos. Las características de LTE se establecieron en el año 2008, en los reportes técnicos TR 25.912 y TR 25.913, versión 8 (en inglés *Release 8*), disponibles en la página de internet [www.3gpp.org](http://www.3gpp.org) las cuales se enlistan en los incisos siguientes:

- 1) Tasa de transferencia de datos de 100 [Mbps] en el canal de bajada tomando en cuenta que se tendrán dos antenas de recepción en el equipo del usuario, y 50 [Mbps] en el canal de subida con una antena de transmisión del equipo del usuario, considerando un ancho de banda de 20 [MHz] para ambos casos.
- 2) Aumentar la tasa de transferencia de datos en los límites de las celdas, que en todo caso, representan los escenarios más desfavorables.
- 3) Incrementar de dos a tres veces más la eficiencia del espectro ofrecida por la tecnología HSDPA y HSUPA.
- 4) Flexibilidad en la elección del ancho de banda empleado: 1.25 [MHz], 1.6 [MHz], 2.5 [MHz], 5 [MHz], 10 [MHz], 15 [MHz] ó 20 [MHz].
- 5) Reducción de la latencia a 10 [ms] para acceso a la red, así como reducir la latencia en los cambios de estado de los equipos celulares en el plano de control.
- 6) E-UTRAN debe de soportar la movilidad del usuario a través de la red celular. En cuanto a servicios de tiempo real como la voz, E-UTRAN podrá llevarlos a cabo en el dominio PS (*Packet Switch*) siempre y cuando mantenga al menos la misma calidad de voz realizada por UTRAN a través del dominio CS (*Circuit Switch*).
- 7) E-UTRAN debe de soportar una gran variedad de escenarios, principalmente en los límites de cobertura con tamaño igual a 5 [km], 30 [km] y 100 [km], en los cuales es necesario verificar la tasa de transferencia de datos, la eficiencia del espectro así como el correcto proceso de movilidad.
- 8) Compatibilidad con sistemas de otras generaciones así como los que no pertenecen a la 3GPP (por ejemplo WLAN y WIMAX).
- 9) Contar con la capacidad de implementación de la tecnología MIMO<sup>1</sup> para incrementar la capacidad del sitio: 2x2 ó 4x4 para enlaces de bajada y 2x2 ó 1x2 para enlaces de subida.

Además de cumplir con estos puntos, es necesario asegurar la calidad de servicio por medio de los indicadores clave de desempeño o KPIs. Los KPIs son aplicados en general para conocer si se han cumplido ciertos niveles mínimos de referencia. En las

---

<sup>1</sup> Cuando se tienen “W” antenas para la transmisión y “V” antenas para la recepción, la configuración MIMO se expresa como *WxV*.

redes celulares permiten conocer el funcionamiento de un sitio y la calidad que ofrece para saber si existen problemas o mejoras que puedan ser implementadas. La UIT define tres tipos de KPIs en la recomendación ITU-T E.804 para las redes móviles: accesibilidad, retenibilidad e integridad; éstas se complementan con dos KPIs más establecidos por la 3GPP en las series TS 32.450 y TS 32.451 específicamente para LTE: movilidad y disponibilidad. Con estos documentos es posible entender y explicar las definiciones de los KPIs que el proveedor de servicios debe tomar en cuenta:

- **Accesibilidad:** Probabilidad de que un usuario pueda recibir la invitación para seleccionar su destino después de haberlo solicitado. Es decir, que a un usuario se le dé el servicio de conexión de datos o voz cuando lo solicita. En LTE esto se conoce como asignación de una portadora E-RAB al equipo del usuario. Este KPI se obtiene dividiendo el número de E-RABs exitosos entre el número total de intentos para obtener un E-RAB.

$$KPI_{\text{accesibilidad}} = \frac{\text{Número de E – RABs establecidos exitosamente}}{\text{Número de intentos realizados para obtener un E – RAB}} \quad (1)$$

- **Retenibilidad:** Es una medida que muestra la cantidad de veces que un servicio se cae cuando el usuario está utilizando la red. En LTE, esto se refiere a las veces que se interrumpe un E-RAB de manera anormal mientras se está utilizando.

$$KPI_{\text{retenibilidad}} = \frac{\text{Número de E – RABs tirados anormalmete con información}}{\text{Tiempo de sesión activa}} \quad (2)$$

- **Integridad:** Dentro de LTE, es un KPI que muestra el impacto que tiene el sitio para entregar la información al equipo del usuario con calidad, es decir, que la información no sufra alteraciones por procesos de codificación y compresión. Se verifica mediante pruebas de tasa de transmisión de datos y latencia.
- **Disponibilidad:** Se dice que la disponibilidad es un estado en el que se puede llevar a cabo una función requerida en un instante dado dentro de un periodo de tiempo. En LTE se refiere al porcentaje de tiempo que una celda está dispuesta a proveer servicios.

$$KPI_{\text{disponibilidad}} = \frac{\text{Tiempo en que una celda está en estado disponible}}{\text{Periodo de tiempo}} \times 100 \text{ [%]} \quad (3)$$

- Movilidad: Está basado en la cantidad de *handovers* exitosos llevados a cabo con otros sitios de LTE y hacia sitios de otra tecnología como GSM o WCDMA.

Es importante aclarar que no hay documentos que especifiquen valores de referencia para cada KPI mencionado, éstos son definidos por el mismo operador basado en un plan de negocios: se estudian las estrategias para lograr una buena satisfacción del cliente con el servicio proveído por cada sitio LTE. De aquí se establecen los valores mínimos de cada KPI y los requerimientos técnicos necesarios para alcanzarlos.

### **2.3 Primeras metodologías de sitios LTE**

Para el año 2008 se propuso que se desplegaran las primeras redes de LTE en el mundo, por lo que diferentes empresas de telecomunicaciones realizaron escenarios de estudio en donde se pudiera conocer el comportamiento de los primeros sitios LTE y verificar que se logaran alcanzar los mínimos requerimientos estipulados por la UIT y la 3GPP. Entre las primeras metodologías se pueden mencionar las realizadas por Ericsson de la tabla 2.1 (Karlsson y Riback, 2008), Vodafone y Alcatel-Lucent de la tabla 2.2 (Irmer et al., 2009) y Fujitsu de la tabla 2.3 (Kiyonagi y Minowa, 2012).

## Metodología realizada por Ericsson en el año 2008

<b>Autores:</b>	Jonas Karlsson y Mathias Riback	
<b>Objetivo:</b>	Estudiar la tasa de transmisión de datos y las relaciones señal a ruido de un sitio construido sobre un edificio de Ericsson en Estocolmo, con anchos de banda de 10 y 20 MHz en la frecuencia de LTE de 2.6 GHz.	
<b>Equipos:</b>	Se utilizaron dos equipos desarrollados por Ericsson: uno para medir las capas física, de enlace de datos y la de aplicaciones; y el otro para llevar a cabo transferencias de archivos y servicios de telefonía y video.	
<b>Escenarios:</b>	Laboratorio para estudiar las relaciones señal a ruido.	Prueba de campo para estudiar la tasa de transmisión de datos.
<b>Procedimiento:</b>	Se midieron relaciones señal a ruido (SNR) a nivel capa física y capa de aplicación. Para la capa física, se utilizó el modelo de propagación EVA y un ancho de banda de 10 MHz; para la capa de aplicación, se utilizó el modelo de propagación PB3 y un ancho de banda de 20 MHz.	Se realizaron recorridos con un vehículo equipado de antenas y GPS para grabar la posición de las muestras. El recorrido se realizó en su mayoría en un radio de 1 km y en algunos casos se tomaron a un poco más de los 4 km alrededor del sitio. También se varió la velocidad del vehículo entre los 5 y 40 km/h, y en calles despejadas, se aumentó a los 100 km/h.
<b>Resultados:</b>	Para la capa física, la configuración MIMO 2x2 muestra en promedio un aumento de 15 dB de SNR con respecto a la configuración 2x1; mientras que MIMO 4x4 supera por 20 dB en promedio a MIMO 2x2. Para la capa de aplicación, se tomaron muestras utilizando TCP y UDP, y se observó que ambos poseen mismos comportamientos de SNR.	Para la capa física, dentro de 1 km alrededor del sitio, la velocidad estuvo entre los 5 y 40 km/h y ancho de banda de 20 MHz: para una configuración MIMO 2x2, la tasa de transmisión de datos medida fue de 170 Mbps; mientras que para una configuración MIMO 4x4 se obtuvo una tasa de transmisión de datos de 260 Mbps. Para la capa de aplicación (TCP), se eligió una carretera donde se aumentó la velocidad a 100 km/h: se midieron 100 Mbps; y alejándose 4 km alrededor del sitio, se obtuvo un valor de 40 Mbps.
<b>Conclusiones:</b>	El análisis de las muestras tomadas en el laboratorio y en campo muestra que LTE cumple los requerimientos expresados por la 3GPP. También se comprobaron las ventajas que ofrece la técnica MIMO para la tasa de transmisión de datos y mejoramiento de SNR.	

**Tabla 2.1** Metodología realizada por Ericsson.

## Metodología realizada por la Alianza NGMN en conjunto con Vodafone y Alcatel-Lucent en el año 2009

<b>Autores:</b>	Ralf Irmer, Hans-Peter Mayer, Andreas Weber, Michael Schmidt, Volker Braun, Michael Ohm, Norbert Ahr, Carsten Jandura, Patrick Marsch, Gerhard Fettweis y André Zoch.	
<b>Objetivo:</b>	Medir latencia y eficiencia espectral de un sitio de LTE de frecuencia de 5 GHz, ubicado en Dresden, Alemania.	
<b>Escenarios:</b>	Laboratorio para estudiar las latencias.	Prueba de campo para estudiar la eficiencia espectral.
<b>Procedimiento:</b>	Se midió la latencia a nivel capa física en tecnología SISO. Se utilizó el modelo de propagación PB3 y un ancho de banda de 10 MHz. Se realizaron 3 pruebas: en la primera se tenía un sólo usuario en la celda, con la celda 100% disponible y sin interferencias; la segunda tiene un sólo usuario en la celda, con la celda 100% disponible pero con interferencias en el enlace de bajada; y en la tercera se tuvieron dos usuarios en la celda pero el segundo usuario tiene ocupada totalmente la celda, en esta prueba no se tuvieron interferencias.	Se tomaron muestras por medio de recorridos alrededor del sitio. Se utilizó un GPS para grabar la posición de las muestras. Para el enlace de bajada se utilizó la configuración MIMO 2x2 y para el enlace de subida se utilizó la configuración 1x2. En ambos casos se tuvo un ancho de banda de 10 MHz y para ambos casos se hicieron dos pruebas: una contando la interferencia de sitios ubicados a 500 [m], y la otra tomando en cuenta interferencias de sitios ubicados a 1732 [m].
<b>Resultados:</b>	Se obtuvieron los siguientes resultados: para la primera prueba, la latencia medida fue de 9.9 [ms]; para la segunda prueba la latencia medida fue de 17.9 [ms]; y en la tercera prueba se tuvo una latencia de 9.8 [ms].	Para el enlace de bajada se tuvieron dos resultados: en la interferencia de sitios de 500 [m], la eficiencia espectral fue de 1.46 [b/s/Hz]; y para la interferencia de 1732 [m], la eficiencia espectral fue de 1.37 [b/s/Hz]. Para el enlace de subida se tuvieron dos resultados: para la interferencia de sitios de 500 [m], la eficiencia espectral fue de 0.97 [b/s/Hz]; y para la interferencia de sitios localizados a 1732 [m], la eficiencia espectral fue de 0.85 [b/s/Hz].
<b>Conclusiones:</b>	El análisis de las muestras tomadas en el laboratorio muestra que la latencia cumple con ser menor a 10 [ms], excepto cuando se tienen interferencias. De la misma forma, la eficiencia espectral obtenida fue de valores similares a los requeridos por la 3GPP.	

**Tabla 2.2** Metodología realizada por Vodafone y Alcatel-Lucent.

## Metodología realizada por Fujitsu en el año 2012

<b>Autores:</b>	Hiroyuki Kiyanagi y Morihiko Minowa.
<b>Objetivo:</b>	Medir la tasa de transferencia de datos y el KPI de movilidad así como conocer el desempeño dentro de un edificio y la experiencia de un usuario al hacer uso de las aplicaciones en un sitio de LTE de frecuencia de 1.7 GHz y un ancho de banda de 5 MHz ubicado en Kawasaki, Japón y que opera con energía natural (solar y eólica).
<b>Escenarios:</b>	Prueba de campo
<b>Procedimiento:</b>	En una configuración MIMO 2x2, se evaluaron la tasa de transferencia de datos así como el KPI de movilidad por medio del diseño de rutas de aproximadamente 1.2 km alrededor del sitio donde se tuvieran recorridos de línea de vista despejada y otros donde hubieran obstrucciones. Para evaluar el KPI de movilidad se hicieron llamadas para conocer la accesibilidad del sitio y luego se forzó el equipo para realizar procesos de <i>handover</i> y contar cuántos se realizaron con éxito. Se hizo también una prueba de tasa de transferencia de datos dentro de un edificio (prueba <i>indoor</i> ). Y por último se llevaron a cabo las siguientes aplicaciones: videoconferencia, televisión y juegos en línea.
<b>Resultados:</b>	La tasa de transferencia de datos de bajada fue en promedio de 34.6 Mbps y la tasa de transferencia de datos de subida fue de 9.5 Mbps. En la línea de vista con dos antenas montadas en el carro (simulando un celular) separadas a $1.5\lambda$ y apuntando una a $45^\circ$ y otra a $-45^\circ$ se tuvieron valores de 34.1 Mbps para enlace de bajada; cuando ambas antenas del carro cambiaron a una posición de $90^\circ$ se obtuvo un valor promedio de 27.2 Mbps en enlace de bajada. En el caso de los recorridos con obstrucciones, el valor de tasa de transferencia de datos de bajada se mantuvo entre 20.7 Mbps y 21.7 Mbps. Para el KPI de accesibilidad, la cantidad de llamadas realizadas mostraron un 95% de éxito y en cuanto a movilidad se obtuvo un 95% de éxito para procesos de <i>handover</i> . Para la prueba <i>indoor</i> , se tuvo un enlace de bajada de 35 Mbps alrededor del sitio, mientras que en las partes más alejadas del sitio dentro de una habitación de 15.8 [m], el enlace de bajada fue de 25 Mbps promedio. Por último, la prueba de aplicaciones fue exhibida en fórums a distancia para demostrar su funcionamiento en tiempo real.
<b>Conclusiones:</b>	Teóricamente un sitio de LTE que opera en un ancho de banda de 5 MHz, la tasa de transferencia de datos de bajada es de 35 Mbps, y la tasa de transferencia de datos de subida es de 9.5 Mbps. Las primeras tasas de transmisión de datos obtenidas en la prueba cumplieron los valores teóricos debido al uso de la técnica MIMO. Para el caso de diferentes posiciones de las antenas colocadas en el carro, se tuvieron mejores valores de relación señal a ruido y tasas de transmisión de datos con $\pm 45^\circ$ que $90^\circ$ . En la prueba de KPI de accesibilidad, el 5% de llamadas fallidas se dio en zonas donde se tuvo una gran interferencia de otros sitios o por ubicarse en zonas de muy grande obstrucción de edificios; para los procesos de <i>handover</i> , se logró el 95% de éxito porque se procuró mantener el mismo valor de tasa de transferencia de datos antes y después del proceso. Para la prueba <i>indoor</i> , se confirmó la influencia de la tecnología MIMO hacia el mejoramiento de la tasa de transferencia de datos. Por último, en la prueba de aplicaciones, se demostraron que las características propias de LTE mejoraron la experiencia del usuario con los servicios de datos.

**Tabla 2.3** Metodología realizada por Fujitsu.

## 2.4 Etapas de preparación de un sitio de LTE

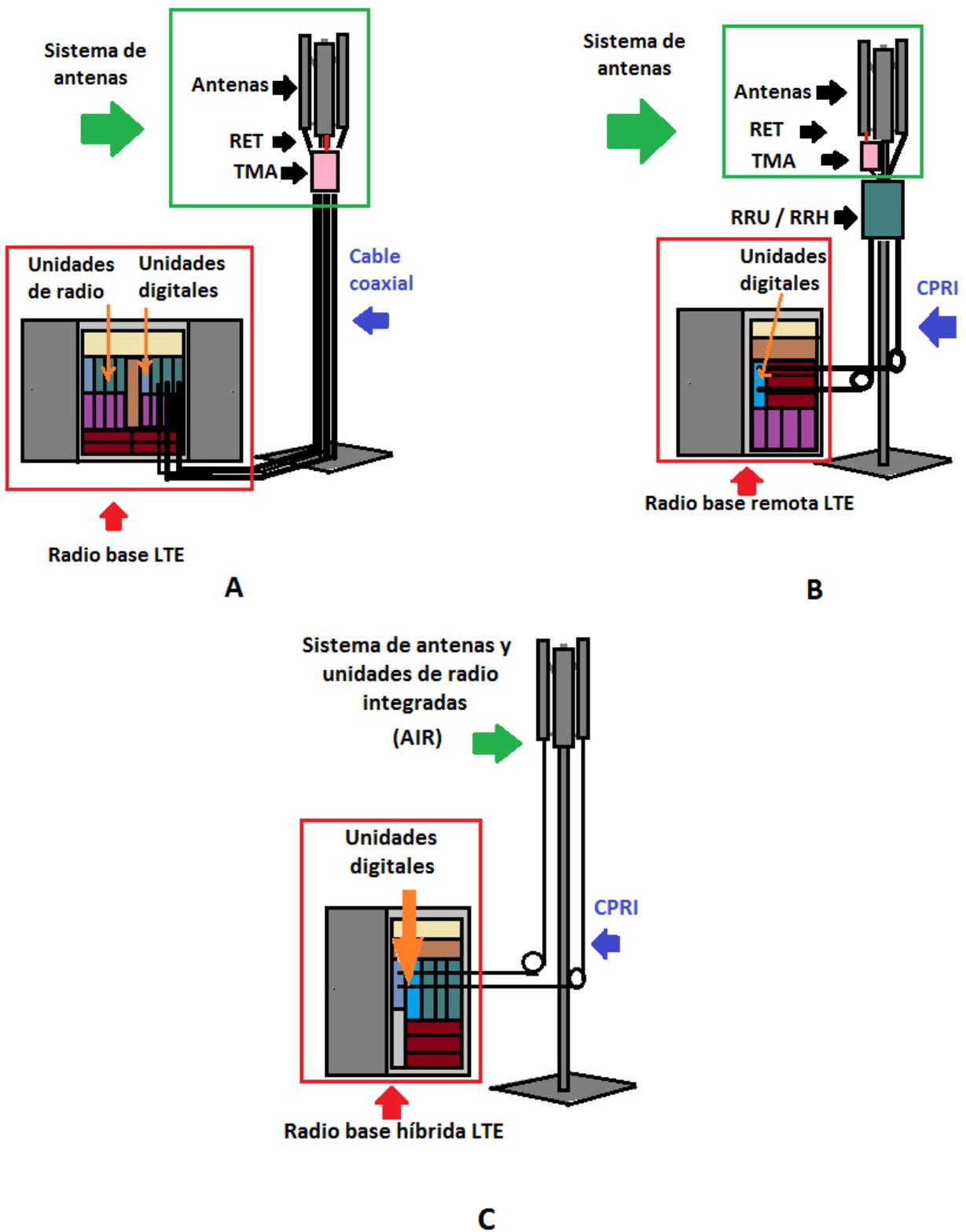
Para que un sitio de LTE pueda proveer servicios de comunicación inalámbrica y móvil, se lleva a cabo un proceso de planeación en el que se establece lo necesario para cubrir la cobertura exigida y el número de usuarios estimado en el área (capacidad). Dicho proceso se forma de cuatro etapas (SNS Telecom, 2011):

- **Primera etapa:** se basa en el uso de modelos de propagación estadísticos para conocer las pérdidas encontradas entre el sitio y el equipo del usuario. De esta primera etapa se obtiene solo el número aproximado de pérdidas ya que únicamente se desea tener una idea de la ubicación del sitio. En el caso del diseño de una red de LTE, de esta etapa se obtiene el número de sitios necesarios.
- **Segunda etapa:** se hace uso de modelos de propagación más detallados en los que se toman en cuenta las características de la antena, el terreno así como mapas que muestran la cantidad de población en cada zona. De esta segunda etapa se confirma la ubicación y se obtiene la altura del sitio así como la dirección y elevación de cada antena; se obtiene el plan de frecuencias, parámetros de la cobertura como RSRP, RSRQ, SINR, y tasa de transmisión de datos de bajada y de subida. Con esta información, se prosigue con la construcción física y configuración del sitio.
- **Tercera etapa:** consiste en optimizar el funcionamiento del sitio LTE en base a muestras recolectadas de cobertura y capacidad. De ello se pueden realizar modificaciones de mejora o corrección como cambiar la altura o la dirección de las antenas, cambiar la potencia, arreglar físicamente la infraestructura, hacer cambios en los parámetros de configuración de movilidad y obtener una visión rápida de cómo están operando los sitios vecinos. Esta tercera etapa también es conocida como fase de **pre lanzado**.
- **Cuarta etapa:** una vez que el sitio se ha lanzado para servir comercialmente a los usuarios, se continúa monitoreando el funcionamiento del sitio y en caso de encontrar algunos detalles por mejorar, se aplican los últimos cambios. Esta etapa se conoce como fase de **post lanzado**.

## 2.5 Elementos que componen a una radio base de LTE para su construcción

En la figura 2.1 se muestran tres tipos de configuración que se pueden encontrar en la infraestructura de un sitio de LTE. Primeramente se observa el sistema de antenas que se compone de tres elementos (Dieng, 2016):

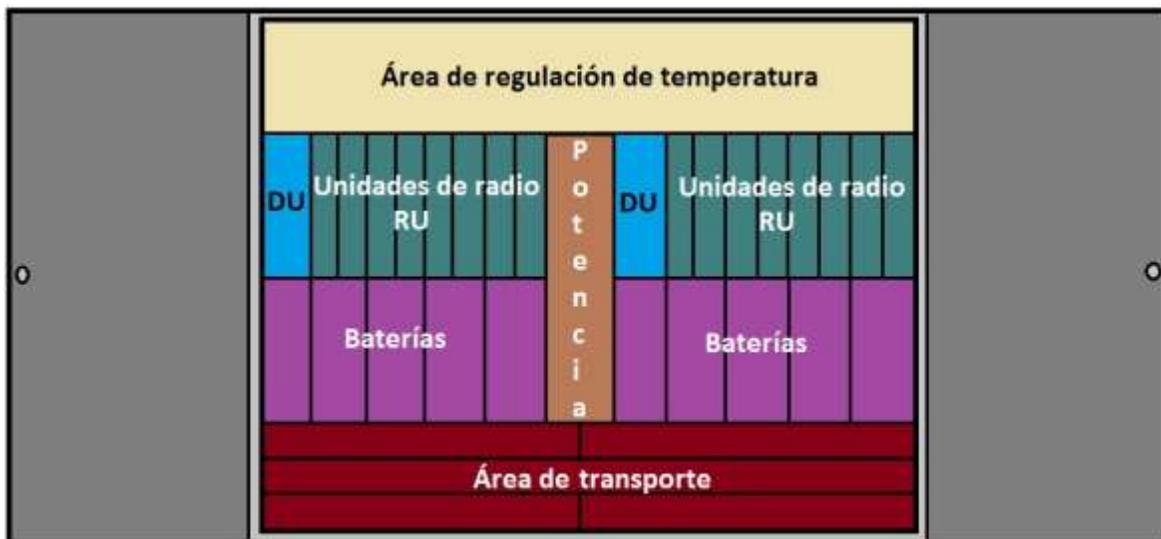
- Antenas, las cuales pueden ser omnidireccionales o direccionales. En el caso de las antenas AIR (*Antenna Integrated Radio*), no sólo se tiene la antena sino que se encuentran integrados el TMA, el RET y la unidad de radio.



*Figura 2.1 Diferentes configuraciones en la infraestructura de un sitio de LTE.*

- EL RET (*Remote Electrical Tilt*) es un dispositivo que se conecta directamente a la antena y permite manipular el tilt eléctrico de ella de manera manual o remota. En la figura 2.1 se representa con una línea roja que sale de las antenas.
- El TMA (*Tower Mounted Amplifier*) es un dispositivo que en la figura 2.1 se representa con un cuadro rosa. Su principal función es disminuir la figura de ruido que recibe la antena al captar información de un equipo del usuario durante el enlace de subida.

Las radio bases de LTE se componen de varios elementos que se muestran en la figura 2.2, donde se tiene un área que regula la temperatura interna, un área de potencia, una sección donde se colocan las unidades digitales (DUs), una sección donde se colocan las unidades de radio (RUs), un área de baterías y una sección de unidades de transporte.



**Figura 2.2** Componentes de una radio base de LTE.

Las funciones de cada parte son:

- El área de regulación de temperatura controla los ventiladores internos que mantienen la temperatura de cada componente de la radio base. Este sistema funciona de forma óptima, es decir, genera poco ruido con un consumo bajo de potencia.
- Sistema de potencia. Alimenta a la radio base de LTE y fue incluida principalmente para que en la implementación física no se tuviera que conseguir una planta de potencia por separado.

- Unidad de radio (RU): además de funcionar como receptor y transmisor, permite amplificar la información transmitida del sitio, filtrar señales y detectar y medir la relación de onda estacionaria (ROE o VSWR en inglés). Este dispositivo se puede colocar en la radio base de LTE o de manera remota con el fin de que quede cerca de la antena y disminuir pérdidas en la información. Cuando se encuentra fuera de la radio base, se le llama unidad de radio remota (RRU ó RRH).
- Unidad digital (DU): lleva a cabo funciones de control de procesamiento de la señal en banda base, se encarga de la sincronización del sitio mediante GPS, interconecta las RUs y contiene interfaces que se conectan a redes LAN y redes de transporte.
- Las baterías funcionan como reserva y dependiendo del tipo de radio base, el tiempo en el que proveen energía varía.
- El área de transporte permite la conexión de las *eNodeBs* con la red *backhaul* LTE para ser conectadas después con los elementos de la red EPC. Soporta protocolos Ethernet, IP, ATM y SDH / PDH.

Las unidades de radio se conectan a las unidades digitales mediante cables coaxiales, pero cuando son unidades de radio remota, se conectan a las unidades digitales mediante fibra óptica llamada CPRI (*Common Public Radio Interface*).

En la imagen A de la figura 2.1 se tiene una radio base de LTE donde se encuentran colocadas las unidades de radio y unidades digitales. En la imagen B de la figura 2.1, la radio base no contiene las unidades de radio porque éstas se colocan cerca de las antenas, este tipo de configuración se conoce como radio base remota. La imagen C de la figura 2.1 muestra una radio base que contiene unidades de radio y además conexiones en sus unidades digitales hacia unidades de radio remotas, en este caso se le nombra radio base híbrida de LTE (Ross, 2016).

## 2.6 Metodologías en etapa de pre lanzamiento de sitios LTE

La metodología que en esta tesis se propone pertenece a la tercera etapa del proceso de planeación: pre lanzamiento. De la arquitectura de LTE, E-UTRAN son los sitios de LTE (*enodeBs*) y los equipos de los usuarios (celulares): en este enlace se tiene la parte de radiofrecuencia y por tanto las metodologías son desarrolladas aquí para medir y tomar las muestras suficientes tanto en la radio base como en un equipo que simulará el comportamiento de un celular. Hoy en día cada operador tiene su propia metodología, pero generalmente se basan en los mismos procedimientos. Un ejemplo disponible en internet es el siguiente (Huawei Technologies Co., 2013):

Metodología en etapa de pre lanzado de un sitio de LTE propuesta por Huawei en el año 2012.
<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Preparación del equipo físico y software con los que se tomarán las muestras.</li> <li>2) Recolección de información mediante recorridos alrededor del sitio para tomar las siguientes medidas de cobertura: niveles de RSRP, RSRQ, SINR y tasa de transmisión de datos de bajada y de subida y número de eventos exitosos de <i>handover</i>.</li> <li>3) Analizar mediante software la información tomada y verificar mediante indicadores clave de desempeño (KPIs) si el sitio alcanza los niveles.</li> <li>4) En caso de que el sitio no opere de forma adecuada, se hace un análisis de cobertura y de movilidad para realizar ajustes en el sitio y en los sitios vecinos: ajuste de altura, elevación y azimut de las antenas; ajuste de potencia y reconfiguración de parámetros de movilidad.</li> <li>5) Una vez hechas las correcciones, se repite esta metodología desde el punto 2.</li> </ol>

**Tabla 2.4** Metodología en etapa de pre lanzado de un sitio LTE propuesta por Huawei.

Otra metodología es la mostrada en la Tabla 2.5 (JDSU, 2012), la cual propone algunas modificaciones, pero el procedimiento es muy similar al anterior:

Metodología en etapa de pre lanzado de un sitio de LTE propuesta por JDSU en febrero 2012.
<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Es necesario contar con dos dispositivos: <ul style="list-style-type: none"> <li>• El primer dispositivo simulará un equipo del usuario (celular).</li> <li>• El segundo será un receptor de monitoreo de entorno de radiofrecuencia.</li> </ul> </li> <li>2) Se realiza la recolección de información con ambos dispositivos mediante el establecimiento de rutas para conocer la información del sitio de la siguiente manera: <ul style="list-style-type: none"> <li>• El primer dispositivo (celular) tomará muestras para monitorear aplicaciones de video, telefonía y correo electrónico; procesos de <i>handover</i>, sincronización, esquemas de modulación, procesos de acceso a la red de LTE, control de potencia así como funcionamiento de MIMO. Se puede incluir aquí un test conocido como IPERF, utilizado para medir ancho de banda y tasa de transmisión de datos tanto en el protocolo UDP y TCP.</li> <li>• El segundo dispositivo tomará muestras para monitorear información de las señales interferentes de LTE: sus frecuencias y PCIs. También se verifica la cobertura mediante niveles de RSRP, RSRQ y SINR.</li> </ul> </li> <li>3) Mediante un software se realiza un análisis de funcionamiento del sitio y se verifica si el sitio cumple con los niveles de desempeño (KPIs).</li> <li>4) En caso de que el sitio no opere de forma adecuada, se hace un análisis basado en la tasa de transmisión de datos que percibe el usuario en diferentes puntos así como de latencia. Los ajustes en el sitio y en los sitios vecinos se hacen en altura, elevación y azimut de las antenas; también se puede modificar la potencia y parámetros de movilidad.</li> <li>5) Una vez hechas las correcciones, se repite esta metodología desde el punto 2.</li> </ol>

**Tabla 2.5** Metodología en etapa de pre lanzado de un sitio LTE propuesta por JDSU.

# Desarrollo de metodología para verificar el funcionamiento de un sitio LTE en etapa de pre lanzado

---

---

En este capítulo se realiza el desarrollo de la metodología para verificar el funcionamiento de un sitio de LTE en etapa de pre lanzado. Es importante aclarar que de acuerdo a las etapas de diseño de un sitio de LTE, esta metodología se aplica en la fase anterior a que el sitio quede listo para prestar servicios de manera comercial a los usuarios. Esto implica que dicha metodología asegure la cobertura y calidad del sitio antes de que todos los usuarios del área se encuentren conectados al mismo tiempo y usando los recursos. Para garantizar un mejor funcionamiento, es necesario continuar con el monitoreo del sitio después de lanzarlo para realizar los ajustes faltantes y lograr que su desempeño sea óptimo según los criterios del operador.

### 3.1 Hipótesis para desarrollo de metodología en etapa de pre lanzado de sitios LTE

Si se desea desarrollar una metodología que tenga como objetivo comprobar el funcionamiento de un sitio de LTE, entonces será necesario conocer las condiciones exigidas por instituciones que a nivel global se encargan de establecerlas, en este caso son la 3GPP y la UIT. En el marco teórico se mencionaron las características de LTE, algunas de ellas forman parte de la configuración propia del sitio (anchos de banda y uso de configuración MIMO); la eficiencia espectral se verifica con simulaciones (Rysavy, 2016) y otras características requieren el conocimiento de radiofrecuencia para verificarse. La metodología de esta tesis se enfoca en verificar estas características. Se propone que el procedimiento para conocer el funcionamiento de un sitio de LTE sea en base a tres etapas, tal y como se muestra en la figura 3.1.



**Figura 3.1** Propuesta de metodología para verificar el funcionamiento de un sitio de LTE.

### 3.2 Propuesta de equipo y software de tecnología de LTE para la medición y toma de muestras

Para analizar el funcionamiento de un sitio de LTE, es importante contar con el equipo que tomará las muestras así como con el software que apoyará en el análisis del sitio, ambos deben ser compatibles con la tecnología LTE. De las investigaciones realizadas a las metodologías del mercado, se concluye que se debe contar con tres equipos de medición: equipo móvil (el cual mostrará la experiencia real del usuario), el scanner (el cual proveerá más datos técnicos útiles para un análisis profundo) y GPS (necesario para el registro de la ubicación y tiempo de las muestras). A continuación se describe la información que se obtiene de cada uno de ellos:

- a) Equipo móvil: ofrece únicamente datos necesarios para conocer la experiencia del usuario, por lo que la información que se obtiene es limitada. El equipo se sincroniza con la frecuencia y reloj que detecta en la red. Para las muestras de interacción con otros sitios, sólo se toman en cuenta las que se llevan a cabo con sitios vecinos registrados por los mismos ingenieros de configuración. En cuanto a la precisión y calidad de las muestras, depende de la potencia y velocidad de procesamiento del equipo móvil. Entre los equipos móviles más comunes para la verificación de un sitio LTE son de Samsung con las versiones: Galaxy Note 4, S5 4G+, S6 y S7, artículos disponibles en el sitio web

[www.samsung.com](http://www.samsung.com); y de la marca Sony Xperia a partir de la versión Z3 en adelante, artículos disponibles en el sitio web [www.sonymobile.com](http://www.sonymobile.com). En la figura 3.2 se muestra la ilustración de algunos de los equipos mencionados.



**Figura 3.2** Equipos móviles propuestos para la metodología.

Fuentes: [www.samsung.com](http://www.samsung.com); [www.sonymobile.com](http://www.sonymobile.com)

- b) Scanner: recolecta información del sitio que el equipo móvil no registra. Toma muestras a una velocidad de 50 veces más rápido que un celular. Sus mediciones son independientes de la red, del operador, de la frecuencia y de la tecnología, dependiendo únicamente del GPS. El scanner posee mayor sensibilidad y rango dinámico. Toma más muestras que un celular en una misma distancia ofreciendo mejor resolución en los resultados. No requiere tarjeta SIM. Su propósito es recolectar y mostrar información desde el punto de vista de radiofrecuencia.



**Figura 3.3** Equipos scanner disponibles en el mercado para la metodología.

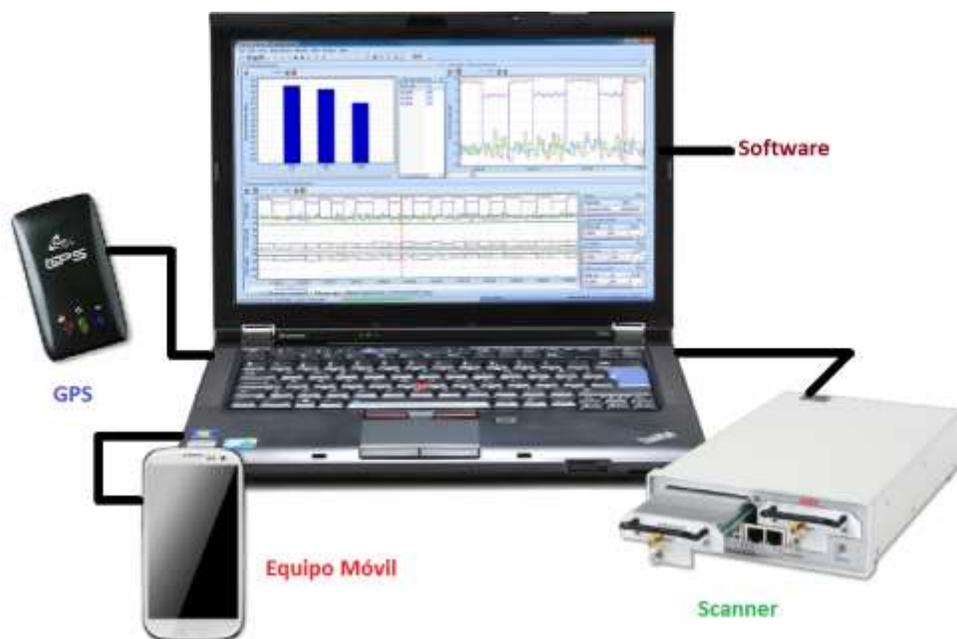
Fuentes: [rfsolutions.pctel.com](http://rfsolutions.pctel.com); [www.rohde-schwarz.com](http://www.rohde-schwarz.com)

En la figura 3.3 se muestran scanner disponibles en el mercado: los equipos PCTEL pueden consultarse en el sitio web [rfsolutions.pctel.com](http://rfsolutions.pctel.com); y los equipos Rohde & Schwarz se encuentran disponibles en el sitio web [www.rohde-schwarz.com](http://www.rohde-schwarz.com).

- c) GPS: Es un sistema de posicionamiento diseñado para localizar cualquier objeto en la Tierra mediante el uso de satélites. Estos dispositivos vienen incluidos en equipos móviles o pueden obtenerse de manera separada.

Una vez que se tienen estos tres dispositivos básicos para las pruebas de campo, será necesario contar con una laptop a la cual se conectarán, y mediante un software será posible procesar y analizar la información proveída por las tres fuentes. Por último, debido a que se tomarán muestras tanto fijas como en movimiento, es conveniente contar con una camioneta en la cual se montarán antenas para la recolección de los datos. En la figura 3.4 se muestra un ejemplo de la conexión de todos los equipos necesarios: GPS, equipo móvil, scanner y laptop que contiene el software para la optimización de redes de sitios LTE. En el caso de la imagen, el software corresponde a la marca Anite disponible en el sitio web [www.anite.com](http://www.anite.com).

Esta técnica en la cual se utiliza un transporte para la toma de muestras alrededor de un sitio de servicio móvil se conoce como *Drive Test* y es una técnica muy utilizada entre las empresas de telecomunicaciones ya que muestra diferentes perspectivas e información real del funcionamiento de la radio base.



**Figura 3.4** Conexión de los dispositivos necesarios para llevar a cabo un Drive Test.

En la tabla 3.1 se hizo un compendio de los scanner más comunes, los cuales deberán ser compatibles con el software instalado en la laptop que procesará las muestras y que al mismo tiempo deberá ser compatible con el sistema operativo del equipo del usuario.

Scanner	Software compatible con el scanner y equipo del usuario	Sistema operativo del equipo móvil
Marca: R&S Modelo: TSME	Marca: Rohde & Schwarz Versión: R&S ROMES4	Android
Marca: R&S Modelo: TSMW	Marca: Rohde & Schwarz Versión: R&S ROMES4	Android
Marca: R&S Modelo: TSMA	Marca: Rohde & Schwarz Versión: R&S ROMES4	Android
Marca: DRT Modelo: 4311B	Marca: Anite Versiones: Nemo Handy, Nemo Analyze Professional, Nemo WindCatcher	Android
Marca: DRT Modelo: 4301A	Marca: Ascom Versiones: TEMS Investigation, TEMS Discovery	Android / IOS
Marca: PCTEL Modelo: Ibflex	Marca: Anite Versiones: Nemo Handy, Nemo Analyze Professional, Nemo WindCatcher	Android
Marca: PCTEL Modelo: EX	Marca: SwissQual Versión: NetQual NQDI Classic	Android
	Marca: Qualcomm Versión: Qualcomm eXtensible Diagnostic Monitor	Android
	IPERF, Jperf y Xjperf	Android
	Marca: Ascom Versión: TEMS Investigation, TEMS Discovery	Android / IOS

**Tabla 3.1** Marcas de dispositivos compatibles para realizar pruebas de *drive test*.

### 3.3 Modelo de calibración para predicción de cobertura de un sitio de LTE

Para tener una idea de la manera en que el sitio de LTE cubrirá el área de interés, es necesario utilizar los modelos de propagación. Estos modelos proporcionan resultados de cálculos matemáticos que no toman en cuenta características propias del área como la cantidad de usuarios que habitan en ella. Es por ello que deben aplicarse métodos que sí incluyan dichas características en los modelos de propagación de tal manera que las áreas de cobertura obtenidas sean muy cercanas al comportamiento real. Este proceso es llamado modelo de calibración y su objetivo es reducir el error entre los valores de pérdidas por trayectoria predichos y los valores de pérdidas por trayectoria reales.

En el documento referenciado en esta tesis como (Forsk, 2016), se explica un método de calibración con software Atoll versión 3.3.2, basado en el modelo de propagación estándar y la fórmula Hata. En ese documento las pruebas de onda continua se miden tomando en cuenta las siguientes características:

- El resultado de un conjunto de pruebas de onda continua representa un solo escenario de propagación de una frecuencia específica y un tipo de área específico (rural, urbano, entre otros).
- Se seleccionan 8 estaciones bases o más que no presenten obstrucciones a su alrededor. Estas estaciones deben tener antenas omnidireccionales.
- Las rutas que servirán para la toma de muestras alrededor de estos sitios, deben de ser aproximadamente de 1 [km] para áreas urbanas, de 2 [km] para áreas suburbanas y de 10 [km] para áreas rurales.
- Se recomienda excluir las rutas que atraviesan bosques y ríos a menos que formen parte del área de cobertura de manera significativa.
- Antes de tomar las muestras, es recomendable realizar un escaneo en el área para asegurar que no existan interferencias.
- Se deben medir al menos entre 10000 y 20000 puntos por cada estación base.

Si se sigue la lista anterior de recomendaciones para la toma de pruebas, será posible obtener una calibración de mejor calidad.

Cuando se importan en Atoll estas medidas de onda continua, se deben importar también los mapas de tráfico y modelos del terreno, con los cuales se finalizará la calibración del modelo de propagación del área.

Este proceso de calibración se realiza en la etapa de diseño de un sitio, y de él se obtienen mapas de cobertura libres de interferencias, libres de otras frecuencias y libres de sitios dominantes.

### 3.4 Primera etapa de la metodología: verificación de cobertura del sitio de LTE

Para llevar a cabo la verificación de cobertura de un sitio de LTE, se propone tomar en cuenta los siguientes aspectos:

1. El área que se quiere cubrir.
2. Los parámetros técnicos que definen la cobertura de una celda LTE.
3. Tomar muestras mediante recorridos alrededor del sitio.

Para el punto uno es necesario contar con los mapas de cobertura obtenidos de la fase de diseño del sitio, del modelo de calibración. En ellos se hizo una estimación del área que cubrirá así como los niveles estimados de potencia recibida.

El segundo punto de la propuesta de medición de cobertura menciona que es necesario tomar en cuenta los parámetros técnicos. Según el documento de la 3GPP 25.215 (3GPP, 25.215), se menciona que existen medidas estandarizadas para LTE que establecen las condiciones y características del funcionamiento de un sitio dentro de una red inalámbrica: RSRP, RSRQ y RSSI. Dichos parámetros clave se definen a continuación (Sesia, Toufik y Baker, 2011) y los rangos mencionados para RSRP y RSRQ así como los efectos que causan en el funcionamiento del sitio LTE son producto de investigaciones realizadas por otros autores (Kreher y Gaenger, 2011):

- RSRP: mide la potencia recibida por el equipo del usuario del sitio LTE servidor. Se calcula a partir del promedio de la potencia que aporta cada RE y es utilizado principalmente para elegir la mejor celda disponible en la red para la conexión de comunicación inalámbrica. Es una referencia esencial para realizar *handovers*. En la tabla 3.2 se muestran los rangos de RSRP así como los comportamientos que se pueden percibir en la calidad y tasa de transferencia de datos.

Nivel de RSRP [dBm]	Observaciones
[-140, -95)	La calidad es inaceptable y la tasa de transmisión de datos es demasiado baja.
[-95, -75)	Se percibe una pequeña degradación en la calidad y la tasa de transmisión de datos decrece un 30 % ó un 50%.
[-75, -44)	Se percibe una calidad muy buena y excelente tasa de transmisión de datos.

**Tabla 3.2** Tabla de rangos de potencia manejados en LTE.

Fuente: (Kreher y Gaenger, 2011)

La figura 3.5 muestra un ejemplo de mapa de cobertura de valores RSRP (Zik y Hoefler, 2016).



**Figura 3.5** Ejemplo de mapa de RSRP con scanner PCTEL.

Fuente: (Zik y Hoefler, 2016)

- RSSI: Es la potencia total recibida por el equipo del usuario proveniente de todas las fuentes, esto incluye no sólo la potencia del sitio LTE servidor, sino de la interferencia de los sitios vecinos y de ruido térmico.
- RSRQ: cuando el equipo del usuario está por elegir una nueva celda, además de realizar lecturas de RSRP, realiza consultas de RSRQ para conocer la calidad de señal. De esta manera el equipo del usuario aumenta la probabilidad de que la conexión de comunicación perdure en la nueva celda. En la formula siguiente el RSRQ se calcula con  $N_{RBS}$  (que es el número de RBs) multiplicado por RSRP y dividido entre RSSI.

$$RSRQ = \frac{N_{RBS} * RSRP}{RSSI} \quad (4)$$

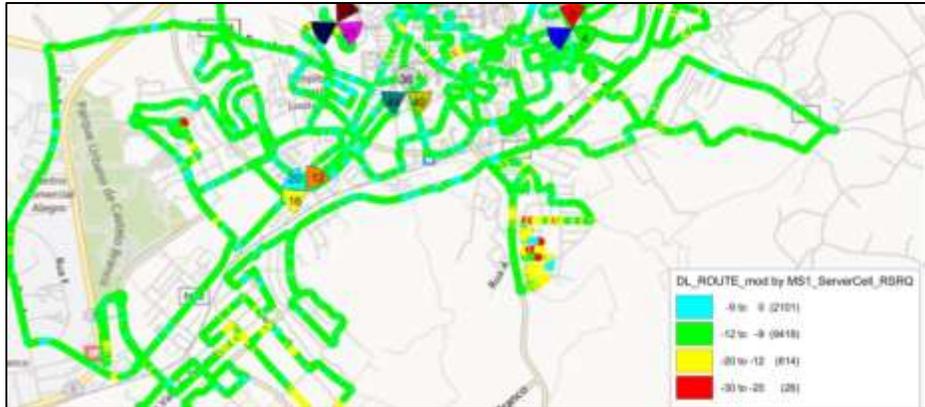
En la tabla 3.3 se muestran los rangos que se manejan para RSRQ y las consecuencias que el usuario podrá percibir en la comunicación.

Nivel de RSRQ [dB]	Observaciones
[-19.5, -12)	La tasa de transmisión de datos es muy baja, existe el riesgo de perder la comunicación.
[-12, -9)	Degradación en la calidad tolerable.
[-9, -3)	Se garantiza al usuario una excelente experiencia.

**Tabla 3.3** Tabla de rangos de RSRQ manejados en LTE.

Fuente: (Kreher y Gaenger, 2011)

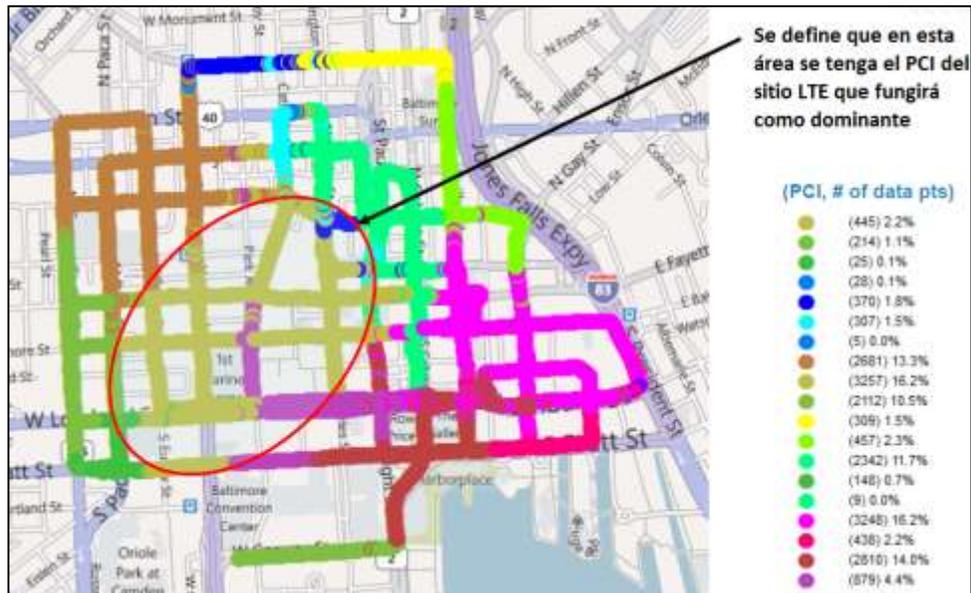
En la figura 3.6 se muestra un ejemplo de mapa de cobertura con valores de RSRQ (Cardoso, 2014), mostrando que la mayoría del área se encuentra en los valores de calidad donde la degradación es tolerable.



**Figura 3.6** Ejemplo de mapa de RSRQ.

Fuente: (Cardoso, 2014)

- Adicionalmente para completar el estudio de cobertura se propone obtener mapas de PCIs, donde se muestran las áreas que cada sitio de la red LTE está sirviendo (áreas de dominio). De esta manera se podrá asegurar que todas las celdas queden con coberturas definidas. La figura 3.7 muestra un ejemplo de mapa de PCIs (Zik y Hoefler, 2016).



**Figura 3.7** Ejemplo de mapa de PCIs con scanner PCTEL.

Fuente: (Zik y Hoefler, 2016)

Los mapas de RSRP, RSSI, RSRQ y PCIs pueden obtenerse tanto del scanner como del equipo del usuario que se elija: los mapas del scanner producen mediciones más fieles y exactas, mientras que los mapas del equipo del usuario son necesarios para conocer la experiencia que vivirá el usuario al hacer uso de dicho sitio de LTE.

Como punto tres de la verificación de cobertura, se propone utilizar la técnica de medición *Drive test*. Esta consiste en tomar muestras de RSRP, RSSI, RSRQ y PCI mediante un conjunto de dispositivos de medición (GPS, laptop, scanner y equipo de usuario) montados en un vehículo. Siguiendo una ruta establecida alrededor de la radio base, el equipo tomará muestras que funcionarán como entradas para el software de análisis del sitio LTE. Para la elaboración de la ruta, se propone utilizar software especializado, algunas sugerencias se enlistan a continuación:

- MapInfo Pro: muestra mapas de áreas con alta resolución y rápido procesamiento. Provee herramientas que hacen la elaboración de rutas más fácil y práctico. Para mayor información, se recomienda visitar la página: [www.pitneybowes.com](http://www.pitneybowes.com)
- Google Earth: explora el relieve, edificios 3D y puede proveer imágenes de perfil donde se pueden observar los obstáculos que enfrentará la señal a lo largo de su trayectoria. Para mayor información puede visitar la página de internet: [www.google.com.mx/intl/es-419/about/products/](http://www.google.com.mx/intl/es-419/about/products/)

Para el diseño de la ruta se propone el siguiente procedimiento:

1. Crear una ruta con software especializado y actualizado.
2. Establecer una frontera dependiendo de la cobertura que se estima cubrirá dicho sitio LTE.
3. Trazar círculos concéntricos para tomar información que nos muestre un mapa completo de la cobertura del sitio. El número de círculos dependerá de qué tanta información deseamos tomar para el análisis de funcionamiento.
4. Asegurar que las calles de mayor tráfico e importancia queden cubiertos por la ruta.
5. Procurar que puntos importantes como estadios, centros comerciales y escuelas queden incluidos en la ruta, esto debido a la gran concentración de usuarios.

Una vez que se ha creado la ruta, se propone recorrerla dos veces porque las condiciones del ambiente cambian y ambas pueden servir como referencia para proveer información.

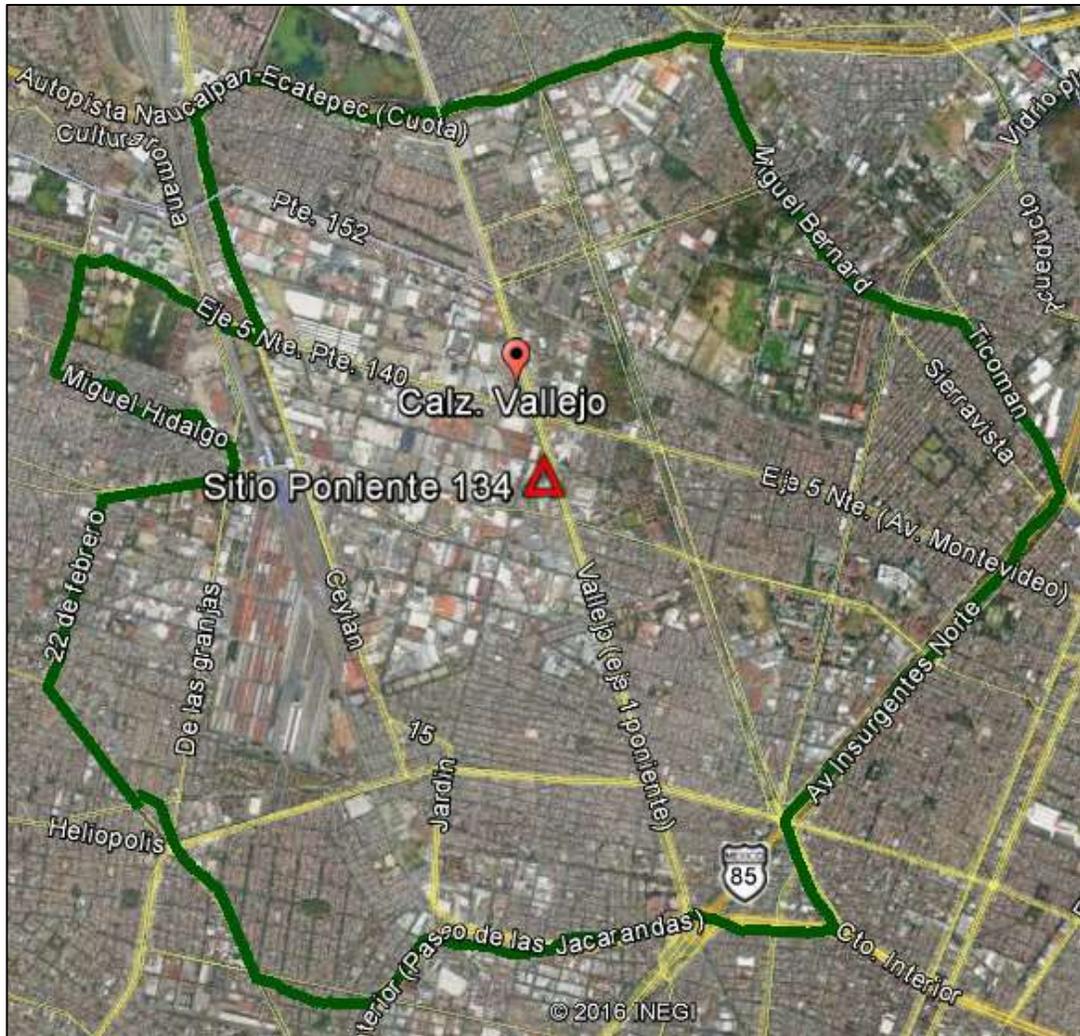
Como ejemplo de la creación de una ruta, se muestra en la figura 3.8 un sitio ubicado sobre la Calzada Vallejo, muy cerca de la estación del Metrobús Poniente 134. El software que se usa para realizar la ruta es Google Earth.



**Figura 3.8** Ejemplo de sitio para la creación de una ruta.

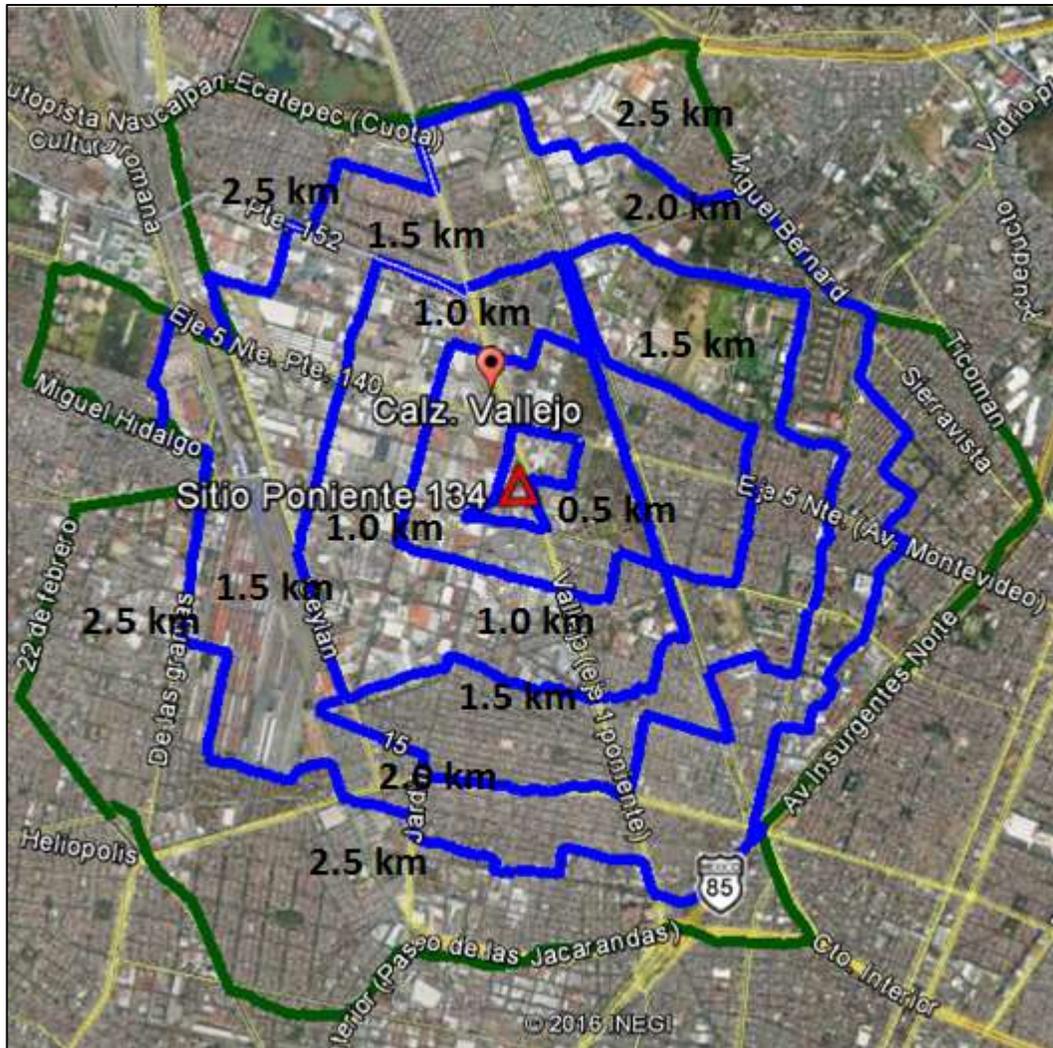
Siguiendo los pasos de la propuesta, se comienza por establecer el límite del área que nos interesa. Este límite se obtiene de los estudios realizados en la etapa de diseño en el que se aplicaron modelos de propagación y calibración de donde se obtuvieron mapas de cobertura para conocer el alcance del sitio.

En este ejemplo, se hace la suposición de un límite el cual está señalado en verde en la figura 3.9:



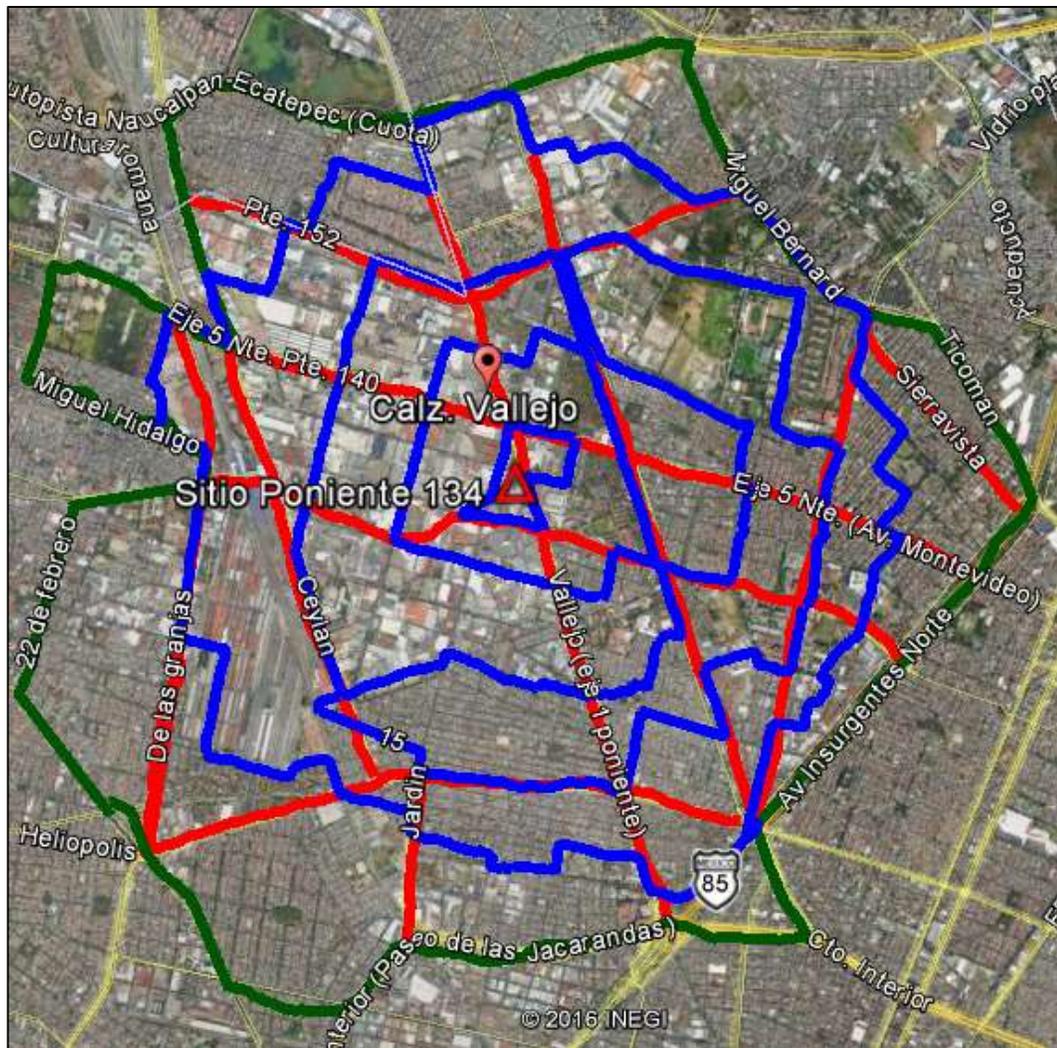
**Figura 3.9** Paso 2 de la creación de una ruta: establecimiento de límites.

Como paso 3, se dibujan los círculos concéntricos distribuidos alrededor del sitio. Para el ejemplo se dibujaron círculos en azul separados cada 500 metros. En la figura 3.10 se observa que el primero se ubica aproximadamente a 500 m (0.5 km) alrededor del sitio, después otro a 1 km, el tercero a 1.5 km, el cuarto a 2 km y el último a 2.5 km. A veces la estructura de las calles no permite obtener de manera exacta los círculos concéntricos, por lo que del lado derecho del mapa se observa que no se dibujó parte del círculo de 1 km y del lado izquierdo no se dibujó parte del círculo de 2 km.



**Figura 3.10** Paso 3 de la creación de una ruta: círculos concéntricos.

El paso 4 consiste en asegurar que las calles de mayor tráfico queden cubiertas por la ruta. En este caso, Google Earth muestra en amarillo las calles detectadas como principales. Es por esto que en la figura 3.11 se muestran en rojo las calles importantes que se deben agregar a la ruta.



**Figura 3.11** Paso 4 de la creación de una ruta: calles de mayor tráfico.

El último paso de la propuesta consiste en asegurar que la ruta cubra los lugares donde existe una gran concentración de clientes, como por ejemplo escuelas, hospitales, museos, estaciones de metro y metrobús. Si en el software habilitamos los principales lugares que detecta Google Earth en el área, podremos comprobar que la ruta está completa y lista para manejarla. En la figura 3.12 se muestra la ruta final que se debe recorrer con un vehículo para la toma de muestras que permitirán hacer el estudio de cobertura.



**Figura 3.12** Paso 5 de la creación de una ruta: lugares de mayor concentración de usuarios.

Al realizar esta primera parte de la metodología, el software de optimización de LTE tomará como entrada las pruebas capturadas del scanner, equipo del usuario y GPS. Después de ser procesadas, se tendrán a la salida los siguientes mapas: los niveles de potencia reales recibidos en cada punto donde se realizó la prueba (mapa RSRP), los niveles de calidad (mapa RSRQ) que garantizan la movilidad del equipo del usuario de una celda a otra, y las áreas de dominio cubiertas por cada celda (mapa PCI).

### 3.5 Análisis de las causas de baja potencia y propuestas de corrección

Durante el diseño de sitios de LTE, se toman en cuenta los elementos que pueden afectar de manera positiva y negativa a la potencia de transmisión. A este conjunto de elementos de atenuación se le llama estudio de *Link Budget*. Se tiene en la tabla 3.4 un ejemplo para LTE donde se enlistan los valores típicos de cada parámetro (SNS Telecom, 2011):

	Parámetros	Valor típico
<b>a</b>	Máxima potencia de transmisión en la radio base. Los valores típicos para el caso de las macro celdas se encuentran en el rango de 20-69 W.	43 – 48 dBm
<b>b</b>	Ganancia de la antena en la radio base	Especificado por el fabricante.
<b>c</b>	Pérdidas en el cable que conecta la radio base y la antena. Se toma en cuenta la longitud del cable, calibre y banda de frecuencia.	1 – 6 dB
<b>d</b>	PIRE de la radio base, calculado como a + b - c	
<b>e</b>	Figura de ruido en el equipo del usuario.	6 – 11 dB
<b>f</b>	Ruido térmico calculado como: <b>K (constante de Boltzmann) x T (290K) x Ancho de banda (dependiendo del bit rate).</b>	-104.5 dBm para 50 Resource Blocks (9 MHz)
<b>g</b>	Ruido en el receptor calculado como e + f	
<b>h</b>	Relación señal a ruido, valor de las simulaciones o mediciones. Influido por la modulación, codificación, número de Resource Blocks y la tasa de transmisión de datos.	-9 a -7 dB
<b>i</b>	Cálculo de sensibilidad en el receptor, g + h	
<b>j</b>	Margen de interferencia causado por otras celdas. Se calcula con $10 \cdot \log_{10}(1+10^{(g/10)})$ .	3 – 8 dB
<b>k</b>	Presencia de señales de referencia en canales de control: PBCH, PDCCH y PHICH ( <i>overhead</i> ).	10 – 25 % = 0.4 – 1.0 dB
<b>l</b>	Ganancia de la antena en el equipo del usuario.	Dependiendo del fabricante.
<b>m</b>	Pérdidas causadas por cuerpo humano (cabeza) o <i>Body Loss</i>	Depende el dispositivo
	Total de pérdidas de potencia en el enlace: d – (i + j + k + m) + l	

**Tabla 3.4** Tabla de valores de *Link Budget* LTE.

Fuente: (SNS Telecom, 2011)

Con el análisis de mapas se pueden detectar los problemas de potencia de la siguiente manera: los mapas de RSRP permiten conocer los puntos donde se tienen niveles bajos de potencia, los mapas de RSRQ permiten conocer los puntos donde se aprecian niveles bajos de SINR, y los mapas de PCI permiten conocer si existen interferencias de otras áreas de dominio. La manipulación de algunos parámetros de *Link Budget* de LTE podría ayudar a mejorar la potencia y cobertura.

#### Potencia en el sitio de LTE y área geográfica

En caso de detectar una cobertura con niveles bajos de potencia principalmente en las áreas donde se pretende cubrir con el sitio de LTE, se sugiere aumentarla directamente desde el transmisor. También será necesario tomar en cuenta que al aumentar la potencia es posible que aumente en la periferia de la celda, por lo que el nivel de potencia también quedará limitado por la cobertura de las celdas vecinas. Igualmente, si en las celdas vecinas existe una cobertura con niveles muy altos de potencia, habrá que disminuirlas

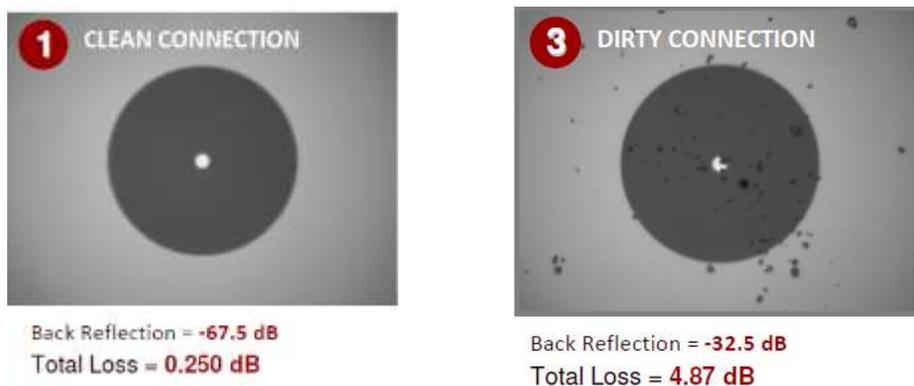
directamente desde el transmisor. De esta manera se podrían definir las áreas de dominio de cada sitio LTE y evitar interferencias.

Otra sugerencia es estudiar el área geográfica donde se ubica el sitio de LTE ya que pueden encontrarse obstrucciones como cerros y grandes edificios, que no permiten la comunicación, por lo que se sugiere en este caso colocar radio bases a parte encargadas de cubrir estas áreas.

### Relación señal a ruido e interferencia (SINR)

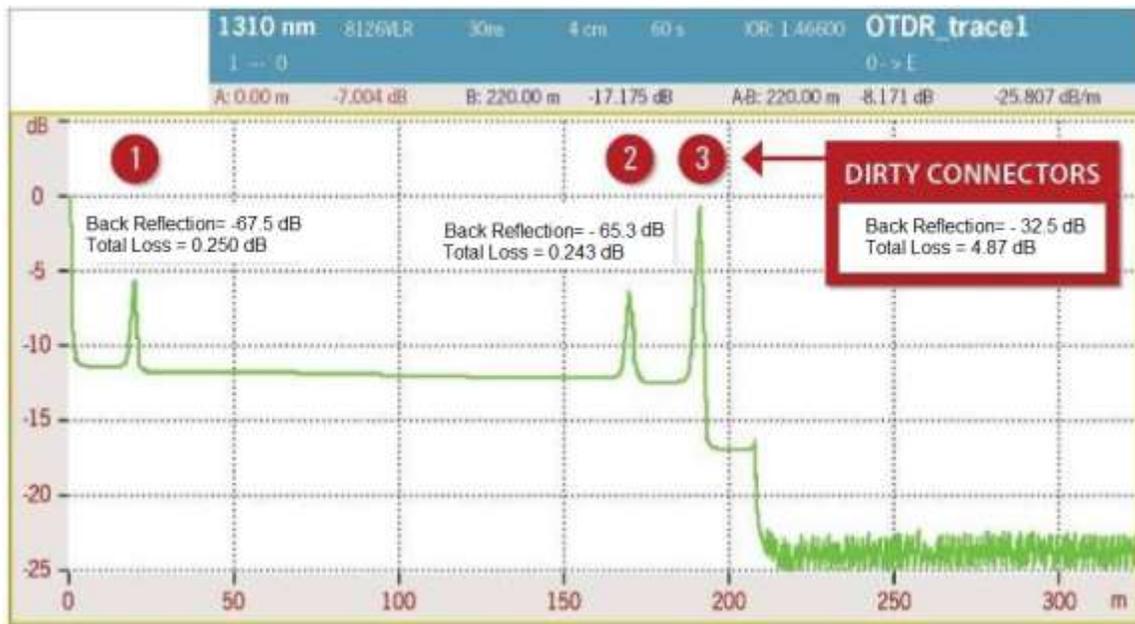
Para aumentar la relación señal a ruido e interferencia (SINR) se recomienda primeramente verificar el estado físico de los cables que conectan las unidades digitales y las unidades de radio, ya que para el caso de fibra óptica, el polvo puede provocar pérdidas adicionales en la potencia.

En la figura 3.14 se muestra una gráfica obtenida del OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*), el cual es un equipo que sirve para conocer las distancias y amplitudes de eventos como los puntos de empalme, atenuaciones y conectores. En este estudio (Zambrano, 2017) se realizó la comparación entre una fibra limpia y una fibra sucia mostradas en la figura 3.13: la fibra limpia presenta una atenuación de 0.25 [dB], mientras que la fibra sucia presenta una atenuación de 4.87 [dB]. Se menciona además que la contaminación en las fibras representa la primera causa de atenuación en las redes ópticas, por lo que para aumentar la SINR en el sitio de LTE, es recomendable mantener limpia la fibra óptica.



**Figura 3.13** Fibra óptica limpia y contaminada.

Fuente: (Zambrano, 2017)



**Figura 3.14** Efectos de la fibra óptica contaminada.

Fuente: (Zambrano, 2017)

Otra manera de aumentar la SINR es cambiar las antenas de la radio base por unas de mejor ganancia. Es importante recordar que entre los principales parámetros para elegir una antena están (Kelly, Zimmerman, Butler y Zheng, 2015):

- Número de *arrays* o columnas. Para servicios de tecnologías móviles como LTE se utilizan antenas sectoriales. Con tres antenas sectoriales de 120° colocadas alrededor de una radio base se logra una cobertura de 360° con un alcance tan grande como el de una antena direccional (C.A Consumibles, 2015). Una antena puede tener más de un *array* o columna y cada columna tiene dos puertos, por lo que para implementar MIMO, se necesita una antena con mínimo 4 puertos (es decir, la antena debe estar conformada de 2 *arrays* ó 2 columnas).
- Banda de frecuencias (*Frequency Band*). Intervalo de frecuencias en la cual debe funcionar satisfactoriamente la antena. Para el caso de México, las empresas de telecomunicaciones ofrecen LTE en los siguientes intervalos de frecuencias (Garrido, 2017; ALTÁN, 2017):

Empresa de telecomunicaciones	Banda de frecuencias para LTE [MHz]
AT&T	1700/2100
Movistar	1900
Telcel	1700/2100
Altán Redes	700

**Tabla 3.5** Tabla de bandas de frecuencias de LTE en México.

Fuente: (Garrido, 2017; ALTÁN, 2017)

- Ancho del haz (*Horizontal HPBW*). Es la distancia angular entre los dos puntos de mitad de potencia (-3 [dB]), teniendo en el centro de ambos puntos el pico de intensidad de radiación. Para cubrir un área específica con una radio base de LTE, se usan las antenas sectoriales las cuales poseen un ancho del haz de entre 60° y 180°.
- Ganancia (*Gain*). Capacidad de una antena para concentrar la energía en cierta dirección. Es una relación entre la densidad de potencia en la dirección de máxima radiación y la densidad de potencia que radiaría con una antena isotrópica ideal.
- Pérdidas de retorno (*Return Loss*). Cantidad de energía reflejada en un puerto RF de la antena.
- Aislamiento puerto a puerto (*Isolation*). Aislamiento entre diferentes puertos de una antena.
- Polarización (*Polarization*). Orientación del vector del campo eléctrico de una onda electromagnética.
- Rango de tilt (*Beam Tilt*). Rango de valores en los cuales la antena se inclina en relación al plano horizontal. Si la antena se inclina de manera física, se tiene un *tilt* mecánico; si se hacen modificaciones en la fase de la señal se tiene un *tilt* eléctrico. No todas las antenas sectoriales cuentan con *tilt* eléctrico ajustable, algunas son fijas. Para realizar ajustes de áreas de dominio de cada sector, se recomienda que los *tilts* eléctricos sean ajustables.
- Relación frente atrás (*Front-to-Back Ratio*). Es la relación de ganancia entre el lóbulo principal y posterior.

Se han investigado diferentes marcas de antenas en el mercado, de las cuales COMMSCOPE (sitio web <http://www.commscope.com/Product-Catalog/>) y KATHREIN (sitio web <http://www.kathreinusa.com/solutions/base-station-antennas/>) ofrecen una amplia variedad de antenas para sitios LTE. A continuación se muestran dos ejemplos, uno de cada marca:

Antena para MIMO con 4 puertos, opera en la banda de 1710-2200. HPBW 65°. Tilt eléctrico ajustable (Kathrein, 2017):

<b>4-Port Antenna</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>
<b>Frequency Range</b>	1710-2200	1710-2200
<b>Dual Polarization</b>	X	X
<b>HPBW</b>	65°	65°
<b>Adjust. Electr. DT</b>	0°-10°	0°-10°

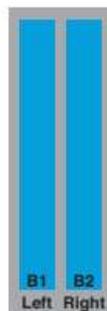
set by hand or by optional RCU (Remote Control Unit)

**KATHREIN**



4-Port Antenna 1710-2200/1710-2200 65°/65° 18/18dBi 0°-10°/0°-10°T

Type No.		742236v01		
		B1; B2		
		1710-2200		
Frequency range	MHz	1710 - 1880	1850 - 1990	1920 - 2200
Polarization	°	+45, -45	+45, -45	+45, -45
Gain	dBi	17.6	17.8	18
<b>Horizontal Pattern:</b>				
Half-power beam width	°	64	64	62
Front-to-back ratio	dB	Copolar: > 30 Total power: > 25	Copolar: > 30 Total power: > 25	Copolar: > 30 Total power: > 25
Cross polar ratio	dB	Typically: 25	Typically: 25	Typically: 25
Main direction	0°	> 10	> 10	> 10
Sector	±60°			
<b>Vertical Pattern:</b>				
Half-power beam width	°	7	6.8	6.5
Electrical tilt	°	0-10, continuously adjustable		
Sidelobe suppression for first sidelobe above main beam	°T dB	0 ... 5 ... 10 20 ... 18 ... 16	0 ... 5 ... 10 20 ... 18 ... 16	0° ... 5° ... 10 16 ... 18 ... 16
Impedance	Ω	50		
VSWR		< 1.5		
Isolation, between ports	dB	> 30		
Intermodulation IM3	dBc	< -150 (2 x 43 dBm carrier)		
Max. power per input	W	250 (at 50 °C ambient temperature)		
Max. eff. power per antenna	W	800 (at 50 °C ambient temperature)		



**Correlation Table**

Frequency range	Array	Connector
1710-2200 MHz	B1	1-2
1710-2200 MHz	B2	3-4

**Figura 3.15** Características técnicas de antena 742236V01.

Fuente: (Kathrein, 2017)

Antena de 6 puertos, donde 2 operan en la banda de frecuencias de 698-896 MHz (por lo que pueden entregar servicios de 3G) y 4 operan en la banda de frecuencia de 1695-2360 MHz (para LTE con tecnología MIMO). HPBW de 65°. Tilt eléctrico ajustable (CommScope, 2017):

## Product Specifications

COMMSCOPE®



### SBNHH-1D65B

**6-port sector antenna, 2x 698–896 and 4x 1695–2360 MHz, 65° HPBW, 2x RET. Both high bands share the same electrical tilt.**

Interleaved dipole technology providing for attractive, low wind load mechanical package

### Electrical Specifications

Frequency Band, MHz	698–806	806–896	1695–1880	1850–1990	1920–2200	2300–2360
Gain, dBi	14.9	14.7	17.7	18.2	18.6	18.6
Beamwidth, Horizontal, degrees	68	66	69	66	63	58
Beamwidth, Vertical, degrees	12.1	10.7	5.6	5.2	5.0	4.5
Beam Tilt, degrees	0–14	0–14	0–7	0–7	0–7	0–7
USLS (First Lobe), dB	14	13	15	15	15	13
Front-to-Back Ratio at 180°, dB	27	29	28	28	28	27
Isolation, dB	25	25	25	25	25	25
Isolation, Intersystem, dB	30	30	30	30	30	30
VSWR   Return Loss, dB	1.5   14.0	1.5   14.0	1.5   14.0	1.5   14.0	1.5   14.0	1.5   14.0
PIM, 3rd Order, 2 x 20 W, dBc	-153	-153	-153	-153	-153	-153
Input Power per Port, maximum, watts	350	350	350	350	350	300
Polarization	±45°	±45°	±45°	±45°	±45°	±45°
Impedance	50 ohm					

Array	Freq (MHz)	Ports	RET (MRET)	AISG RET UID
R1	698-896	1-2	1	ANXXXXXXXXXXXXX.1
Y1	1695-2360	3-4	2	ANXXXXXXXXXXXXX.2
Y2	1695-2360	5-6		

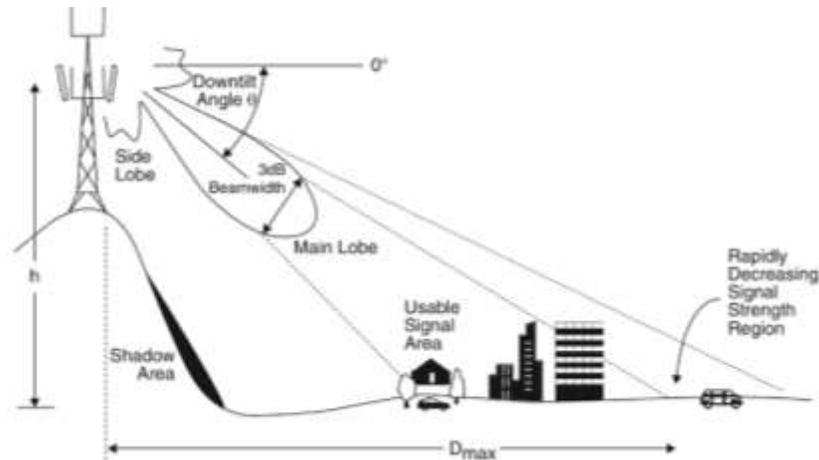


**Figura 3.16** Características técnicas de antena SBNHH-1D65B.

Fuente: (CommScope, 2017)

## Áreas de dominio

Al analizar los mapas de PCI, se podrán ver las áreas de cobertura correspondientes a cada sector de cada radio base de LTE. Cuando las coberturas llegan a interferir las áreas vecinas, será necesario realizar un ajuste de *tilt* en las antenas. Así las antenas se pueden redirigir hacia las áreas de más interés para proveer servicio de telecomunicaciones como se muestra en la figura 3.17 (Zhang, 2018).

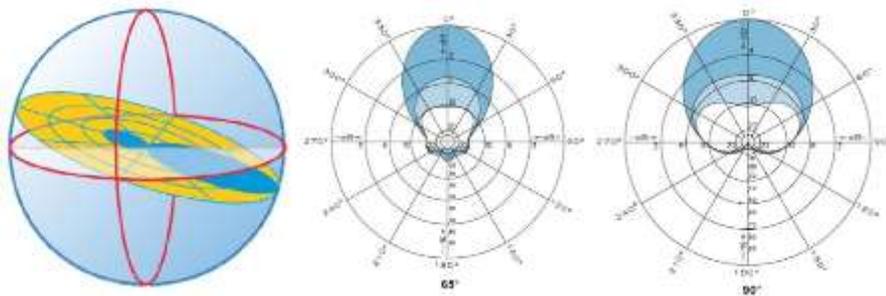


**Figura 3.17** Ajuste de áreas de dominio.

Fuente: (Zhang, 2018)

Como ya se ha explicado anteriormente, existen dos tipos de *tilt*:

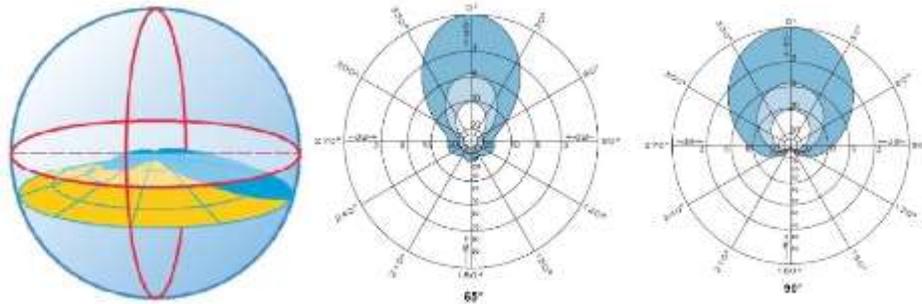
- 1) *Tilt* mecánico. Se inclina físicamente la antena, se ajusta durante la instalación. En este caso se modifica el ancho del haz de la antena hacia los lados, como en los patrones de radiación de la figura 3.18 (ATDI, 2017). La ventaja de este *tilt* es que disminuye la interferencia del lóbulo trasero.



**Figura 3.18** Modificación de patrones de radiación con *tilt* mecánico.

Fuente: (ATDI, 2017)

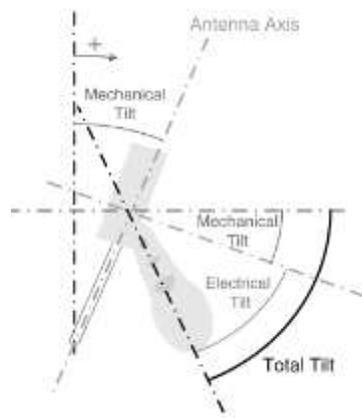
- 2) *Tilt* eléctrico. Modifica la fase de la señal de entrada y su ajuste se hace de manera remota con el uso de un RET que va conectado en la antena. La ventaja de este *tilt* se observa principalmente en antenas omnidireccionales, donde la interferencia se reduce en todas las direcciones. En la figura 3.19 se muestra la modificación en los patrones de radiación para las antenas con diferentes valores de *tilt* eléctricos (ATDI, 2017).



**Figura 3.19** *Modificación de patrones de radiación con tilt eléctrico.*

Fuente: (ATDI, 2017)

La suma del *tilt* eléctrico y *tilt* mecánico forman el *tilt* total, el cual se define como la inclinación máxima del ancho del haz con respecto al plano horizontal. En la figura 3.20 se muestra gráficamente el *tilt* total (Zhang, 2018).



**Figura 3.20** *Tilt total de una antena.*

Fuente: (Zhang, 2018)

Otro problema que puede ser observado en el mapa de PCI es que las áreas de dominio no corresponden con los PCI establecidos, por lo que en este caso se recomienda checar la conexión física que conecta de la radio base a las antenas de cada sector así como checar en la configuración la correcta relación entre cada antena con el sector correspondiente.

Una vez que se han llevado a cabo los ajustes en el transmisor, en el cableado y en las antenas, se realiza de nuevo la prueba de cobertura hasta que los mapas de RSRP, RSRQ y PCI sean aceptables.

Con esto se concluye el procedimiento de verificación de cobertura por medio de la metodología, explicando los problemas que se pueden detectar con ella y las soluciones que se proponen para corregirlos.

### 3.6 Segunda etapa de la metodología: verificación de la tasa de transmisión de datos de bajada y de subida

Cuando se desea medir la tasa de transmisión de datos de un sitio, se debe especificar si se realiza en la capa física o en la capa de aplicación ya que, con base en el documento TR 37.901 de la 3GPP, son tasas de transferencia diferentes. A continuación se describe su diferencia:

- a) Tasa de transmisión de datos en la capa física. Se define como la cantidad de datos que están siendo transmitidos en bits por segundo. Dicha tasa de transmisión muestra la capacidad propia del canal. Dentro del conjunto de bits transmitidos no sólo se tiene la información útil del usuario, sino que además se tienen bits de retransmisión y bits de cabeceras agregadas por otros protocolos.
- b) Tasa de transmisión de datos en la capa de aplicación. Toma en cuenta solo aquellos datos útiles para el usuario, excluyendo las cabeceras agregadas por protocolos como TCP y UDP así como bits de retransmisión. Uno de los factores que limita la tasa de transmisión de datos en la capa de aplicación es la categoría a la que pertenece el equipo móvil del usuario, para más información consultar la tabla B.16.

Para mostrar la diferencia entre la tasa de transmisión de datos en la capa física y en la capa de aplicación, se muestra un ejemplo en la figura 3.21: se tiene un canal en el que se están transmitiendo datos en un segundo, la tasa de transferencia de datos en la capa de aplicación es igual a 5 bits/segundo, mientras que la tasa de transferencia de datos en la capa física es igual a 15 bits/segundo.



D = Bits de información útiles del usuario

R = Bits utilizados para la retransmisión de datos

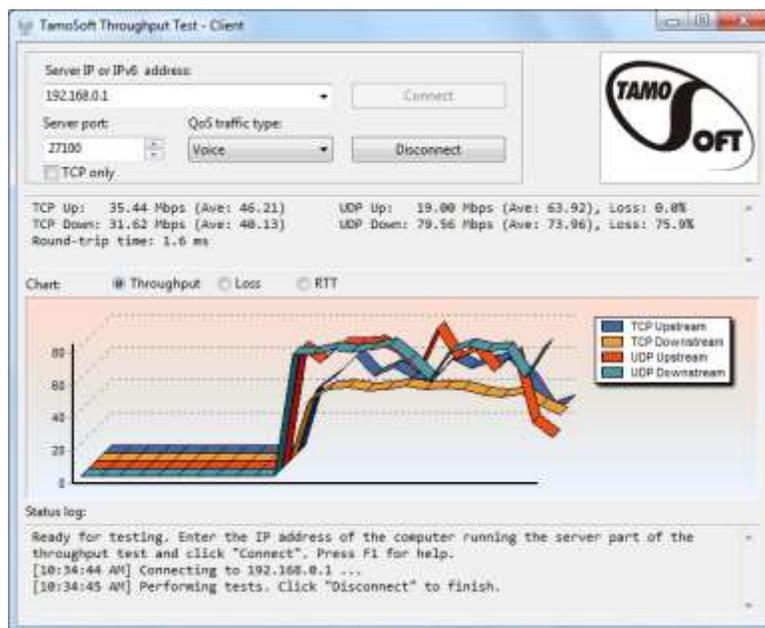
C = Bits que forman parte de cabeceras de protocolos

**Figura 3.21** Tasa de transmisión de datos de capa física y capa de aplicación.

Para llevar a cabo la medición de transferencia de datos en la capa física, es necesario contar con un scanner y una laptop con software especializado para recolectar las pruebas. Una vez que se obtienen los datos obtenidos de la prueba, se podrán comparar con las tasas de transmisión de datos de capa física que la 3GPP ha especificado en los reportes técnicos TR 25.913 y TR 25.912 (3GPP, 25.912; 3GPP, 25.913):

*“Tasa de transmisión de datos de 100 [Mbps] en el canal de bajada con una configuración de dos antenas receptoras en el equipo del usuario, y 50 [Mbps] en el canal de subida con una configuración de una transmisora del equipo del usuario, considerando un ancho de banda de 20 [MHz] para ambos casos”*

Para medir la tasa de transferencia de datos en la capa de aplicación, se necesita un equipo móvil y una laptop con software diseñado para medir la tasa de transferencia de datos a partir de los protocolos de transporte. Existen muchos tipos de software, por ejemplo TamoSoft, Iperf y Jperf (versión gráfica de Iperf) ilustrados en la figura 3.22 (Tamosoft, 2016). En la figura 3.23 se muestra un ejemplo de los comandos que se ingresan en la laptop con software Iperf que medirá un flujo de datos UDP (Sahin, 2012). En esta prueba se necesita un servidor al que se conecta el equipo móvil para establecer la conexión de prueba.



**Figura 3.22** Programa Tamosoft para medir la tasa de transferencia de datos.

Fuente: (Tamosoft, 2016)

```

Administrator: C:\windows\system32\cmd.exe
C:\nedim\iperf>iperf -c 192.168.1.100 -u
Client connecting to 192.168.1.100 UDP port 5001
Sending 1470 byte datagrams
UDP buffer size: 8.00 KByte (default)
-----
[156] local 192.168.1.100 port 54289 connected with 192.168.1.100 port 5001
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
[156] 0.0-10.0 sec  1.25 MBytes  1.05 Mbits/sec
[156] Server Report:
[156] 0.0-10.0 sec  1.25 MBytes  1.05 Mbits/sec  1.350 ms  0/ 893 <0%>
[156] Sent 893 datagrams
C:\nedim\iperf>

```

**Figura 3.23** Programa IPERF y comandos para medir la tasa de transferencia de datos UDP.

Fuente: (Sahin, 2012)

Dentro del documento TR 37.901 (3GPP, 37.901), se mencionan los servicios que los usuarios utilizan de manera común así como el protocolo de transporte necesario. En la tabla 3.6, se muestra un resumen de esta información organizada en tres columnas: la primera menciona el protocolo de transporte (UDP o TCP), la segunda explica la importancia de cada protocolo, y la tercera enumera los servicios del usuario en las que se aplican dichos protocolos.

Protocolo de capa de transporte	Importancia de su uso	Servicios del usuario que utilizan dicho protocolo de transporte
TCP	Permite una transferencia de datos confiable.	FTP, HTTP y VoIP.
UDP	Permite una transferencia rápida en tiempo real.	Media: videos, música y videojuegos.

**Tabla 3.6** Tabla de protocolos de transporte y servicios en los que están presentes.

A diferencia de los valores de referencia ya establecidos por la 3GPP para la capa física, en la capa de aplicación no existen tasas de transferencia de datos establecidas, por lo que a cada operador le corresponde establecerlas con base a sus estrategias de negocio.

El reporte técnico establece que las mediciones en capa física y de aplicación deben de realizarse tanto para puntos fijos como en movimiento. Con las muestras tomadas en puntos fijos se podrá conocer cuál será la máxima tasa de transmisión de datos que el sitio puede entregar en la capa física y en la capa aplicación. Esto es debido a que los valores son más estables y la información que se coloca en cada recurso para ser transmitido es constante. Es por eso que para medir ambas tasas de transmisión de datos se propone primero realizarlas en puntos fijos con línea de vista despejada pero en distancias diferentes:

- Primer escenario: Puntos cercanos al sitio.
- Segundo escenario: Muestras alejadas del sitio donde se espera tener una buena cobertura.

Una vez que se ha tenido información sobre las tasas de transmisión de datos más altas que entregará el sitio, se podrá conocer si opera con los valores mínimos establecidos por la 3GPP para el caso de la capa física, o con los valores mínimos establecidos por el operador para el caso de la capa de aplicación; en caso de que no haya alcanzado los valores mínimos, se procederá a realizar un análisis para conocer la causa y llevar a cabo las correcciones de mejora.

Después de la prueba de la tasa de transmisión de datos en puntos fijos, se podrá continuar con las pruebas de movimiento. Las velocidades de un receptor en movimiento que LTE soporta se muestran en la tabla 3.7: la columna de la izquierda enlista los rangos de velocidad soportados expresados en km/h y la columna de la derecha describe la calidad de comunicación esperada (Dahlman, Parkvall, Sköld y Beming, 2007). Con esta tabla, se podrá tener una referencia para evaluar las muestras tomadas en movimiento y saber si será necesario realizar de nuevo un análisis del sitio para llevar a cabo acciones de mejora del funcionamiento.

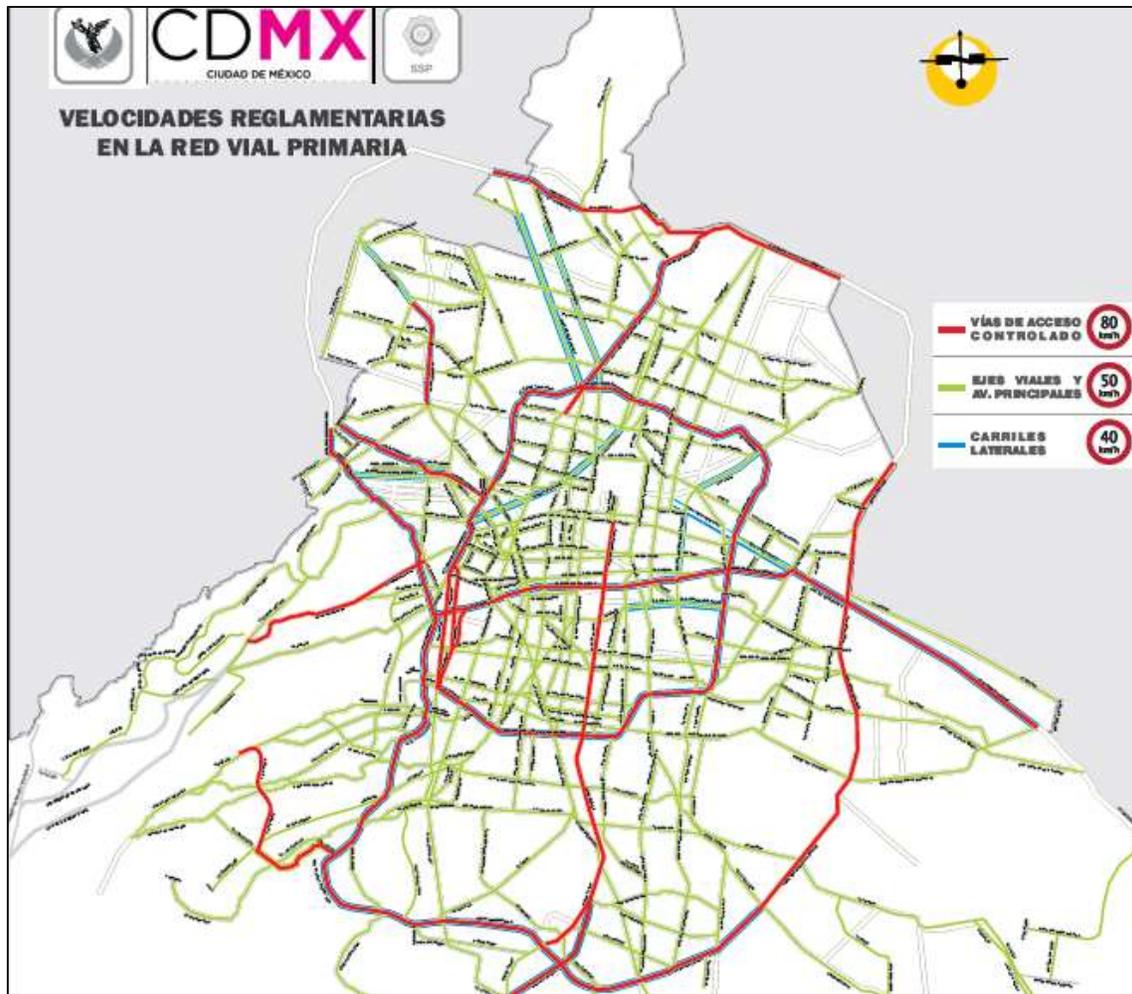
Velocidad soportada por LTE (km/h)	Calidad comunicación esperada
0 – 15	Máxima
16 - 120	Alta
121 – 350	Mantiene por lo menos la conexión de comunicación.

**Tabla 3.7** Tabla de velocidades de un receptor en movimiento soportadas por la tecnología LTE.

Fuente: (Dahlman, Parkvall, Sköld y Beming, 2007).

Será conveniente tomar muestras en movimiento de diferentes lugares como carreteras, calles, puntos con línea de vista despejada, puntos con obstrucciones, en lugares clave como hospitales, estadios, etc.

Para la Ciudad de México, por ejemplo, se puede consultar la página de internet de la Secretaría de Seguridad Pública donde está disponible el mapa de las velocidades máximas permitidas para las calles primarias o principales mostrado en la figura 3.24 (sitio web [http://data.ssp.cdmx.gob.mx/reglamentodetransito/limites\\_velocidad.html](http://data.ssp.cdmx.gob.mx/reglamentodetransito/limites_velocidad.html)). Si el sitio a evaluar se encontrara cerca de alguna de estas calles, se puede conocer la velocidad en que deben de tomarse las muestras en movimiento, y con la tabla de velocidades se tendría una idea de la calidad de comunicación esperada.



**Figura 3.24** Mapa de las velocidades máximas permitidas para las calles principales de la Ciudad de México.

Fuente: [http://data.ssp.cdmx.gob.mx/reglamentodetransito/limites\\_velocidad.html](http://data.ssp.cdmx.gob.mx/reglamentodetransito/limites_velocidad.html)

Con esta segunda etapa de metodología es posible detectar las áreas donde el cliente experimentará tasas de transmisión de datos bajas, problema al cual se sugieren las siguientes soluciones:

- 1) Se recomienda utilizar la técnica MIMO para mejorar su capacidad.
- 2) Aplicar alguna de las técnicas de aumento de capacidad y cobertura estudiadas en la sección A.5 del anexo A de esta tesis.
- 3) Aumentar el ancho de banda si el operador puede disponer de ello.
- 4) Verificar que físicamente el cableado se encuentre limpio y en perfecto estado, en especial si es fibra óptica el medio de conexión entre las unidades de radio y la radio base.

De esta manera se concluye la segunda etapa de la metodología en la cual se verifican las tasas de transmisión de datos.

### 3.7 Tercera etapa de la metodología: verificar la calidad de servicio con KPIs

Para medir y analizar estos cinco KPIs, es necesario contar con el equipo de *drive test*: scanner, equipo del usuario y laptop con software especializado. El scanner se encargará de registrar el tiempo y la ubicación exacta en que sucede cada evento; el equipo del usuario guarda toda la mensajería, es decir, registra todas las notificaciones que se enviaron entre el equipo del usuario y el sitio para llevar a cabo cada evento; el software se encarga de reunir información de ambos dispositivos para que pueda analizarse y conocer los problemas que presenta. A continuación se explica por qué es importante medir cada KPI, su definición según la 3GPP (3GPP, 32.450) y su fórmula donde se mencionan el nombre de los contadores presentes en la mensajería de LTE.

#### Accesibilidad

Desde el punto de vista del negocio de las telecomunicaciones, la primera impresión que percibe un cliente al utilizar sus servicios es poder acceder a ellos. Cuando existen problemas para utilizar los recursos de un sitio, es muy probable que el usuario cambie de operador. Por lo que para las empresas tener una buena accesibilidad se ha convertido en una referencia para evaluar un sitio.

Este KPI se define como la probabilidad de establecer de manera exitosa un E-RAB y se calcula mediante el número de accesos exitosos dividido entre el número total de intentos. En el documento de las 3GPP (3GPP, 32.450) se define el cálculo de accesibilidad con los contadores involucrados entre el sitio y el equipo del usuario. Las fórmulas son:

$$A1 = \text{InitialEPSBEstabSR} = \frac{\sum_{\text{cause}} \text{RRC.ConnEstabSucc.[cause]}}{\sum_{\text{cause}} \text{RRC.ConnEstabAtt.[cause]}} \times \frac{\sum \text{S1SIG.ConnEstabSucc}}{\sum \text{S1SIG.ConnEstabAtt}} \times \frac{\sum_{\text{QCI}} \text{ERAB.EstabInitSuccNbr.[QCI]}}{\sum_{\text{QCI}} \text{ERAB.EstabInitAttNbr.[QCI]}} \times 100 \quad (5)$$

Donde:

A1= Accesos exitosos cuando un usuario se conecta por primera vez.

InitialEPSBEstabSR = Establecimiento de una conexión inicial EPS.

RRC.ConnEstabSucc = Conexión RRC exitosa.

RRC.ConnEstabAtt = Intento para establecer una conexión RRC.

S1SIG.ConnEstabSucc = Conexión S1 exitosa.

S1SIG.ConnEstabAtt = Intento para establecer una conexión S1.

ERAB.EstabInitSuccNbr = Establecimiento exitoso de una conexión inicial ERAB.

ERAB.EstabInitAttNbr = Intento de establecimiento de una conexión inicial ERAB.

$$A2 = \text{AddedEPSBEstabSR} = \frac{\sum_{QCI} \text{ERAB.EstabAddSuccNbr.[QCI]}}{\sum_{QCI} \text{ERAB.EstabAddAttNbr.[QCI]}} \times 100 \quad (6)$$

Donde:

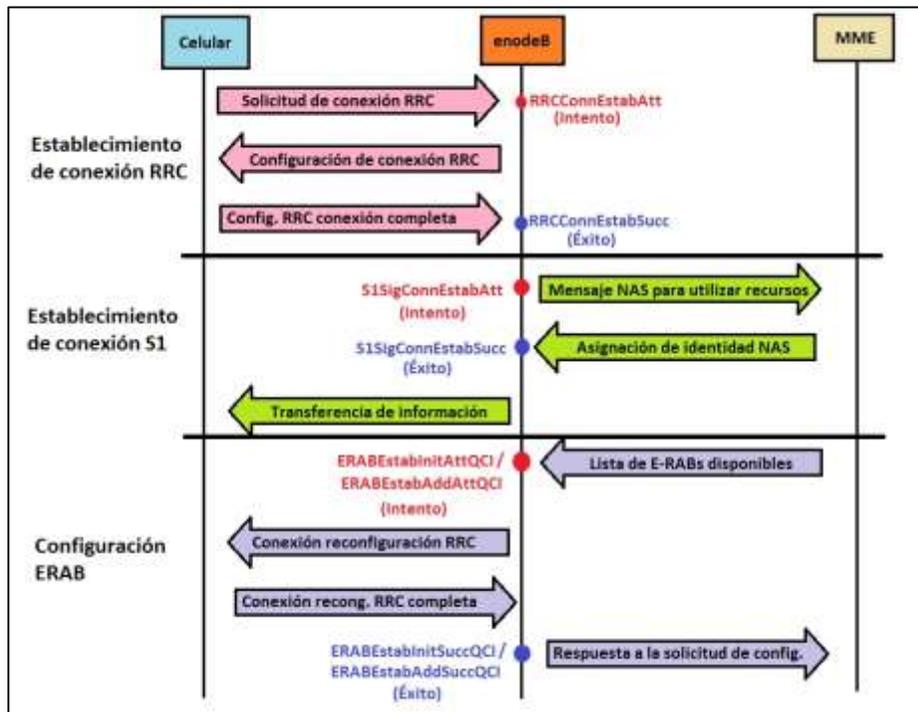
A2 = Es la asignación de recursos a un usuario que viene de un proceso de *handover*.

AddedEPSBEstabSR = Establecimiento de una conexión EPS adicional.

ERAB.EstabAddSuccNbr = Conexión exitosa ERAB adicional.

ERAB.EstabAddAttNbr = Intento para establecer una conexión ERAB adicional.

La fórmula (5) mide los accesos exitosos cuando un usuario se conecta por primera vez a la celda mientras que la fórmula (6) se refiere a la asignación de recursos a un usuario que viene de un proceso de *handover*. La figura 3.25 (EventHelix, 2017) (Srinivasa y Gajula, 2011) ilustra los contadores para la fórmula (5) donde se puede observar que un celular que se conecta desde el inicio a una celda debe pasar por tres etapas: conexión RRC, conexión S1 y configuración del E-RAB. Por esta razón, la fórmula (5) tiene tres productos los cuales corresponden a cada etapa; para el caso de la fórmula (6) únicamente se toma en cuenta la etapa de configuración de E-RAB. También en la figura 3.25 se han indicado los puntos donde se hace el conteo de los intentos y el conteo de los éxitos para las tres etapas.



**Figura 3.25** Eventos de Intento y éxito durante el procedimiento de accesibilidad en LTE.

El operador establece la probabilidad mínima de accesibilidad. Si, por ejemplo, elige 99% como valor mínimo, quiere decir que debajo de este número el sitio requiere de mejoras para alcanzar el valor requerido.

### Retenibilidad

Desde el punto de vista del negocio de las telecomunicaciones, si un usuario se enfrenta a la situación en la cual se interrumpe el servicio de manera anormal y de forma frecuente, puede generar que los clientes cambien de operador. Por lo que este KPI se ha convertido en otra referencia importante para evaluar un sitio.

El KPI de retenibilidad se define como el número de E-RABs con información que de manera anormal se liberan durante el tiempo de una sesión normal. En base a la 3GPP, la fórmula para calcularla es la siguiente:

$$KPI\_Retenibilidad = \frac{ERAB.RelActNbr.QCI_{QCI=x}}{ERAB.SessionTimeQCI.QCI_{QCI=x}} \quad (7)$$

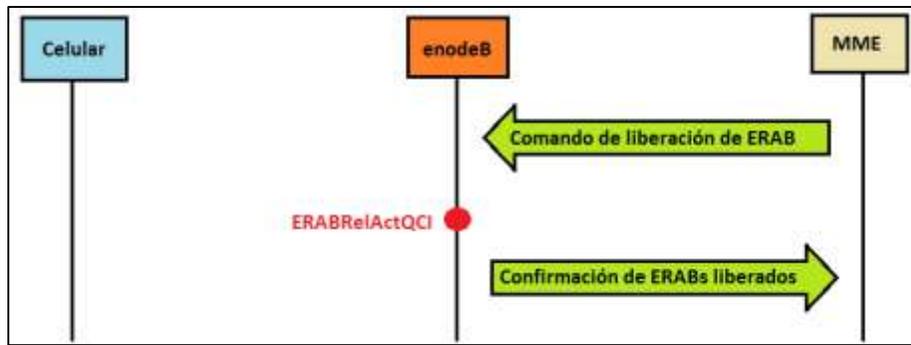
Donde:

ERAB.RelActNbr.QCI = Conexiones ERAB liberadas de manera anormal.

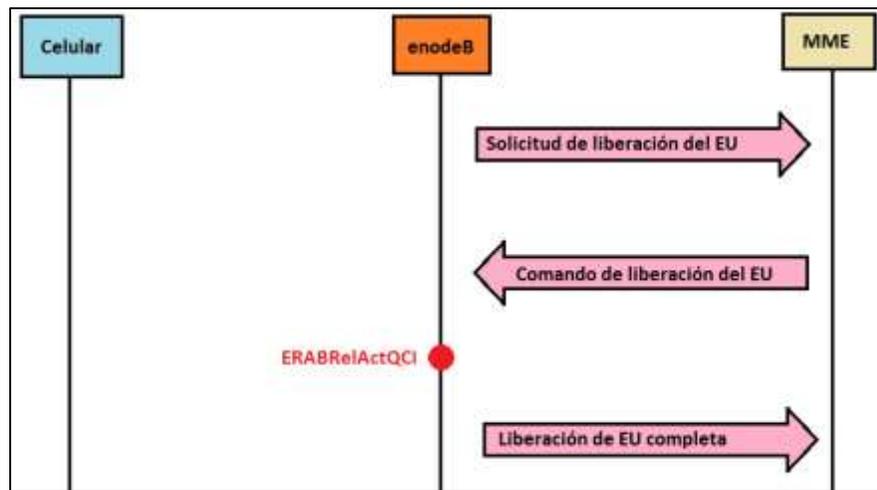
ERAB.SessionTimeQCI.QCI = Sesión de tiempo.

Existen dos tipos de liberación de recursos de manera anormal: el primero se observa en la figura 3.26 (EventHelix, 2017) (Srinivasa y Gajula, 2011), donde en base a las tres etapas pertenecientes al KPI de accesibilidad, la liberación de recursos se realiza a partir de la etapa tres (configuración de E-RAB); el segundo procedimiento se observa en la figura 3.27 (EventHelix, 2017) (Srinivasa y Gajula, 2011) donde la liberación se realiza desde la etapa uno (conexión RRC).

Para medir el KPI de retenibilidad, se recomienda hacerlo en un tiempo mayor a la sesión normal así como tomar algunas pruebas durante el proceso de *handover*.



**Figura 3.26** Proceso de liberación de E-RABs.



**Figura 3.27** Proceso de liberación del equipo de ERABs y equipo de usuario de la celda.

### Integridad

Este KPI mide la calidad de los servicios de datos mediante dos aspectos: tasa de transmisión de datos y latencia. La prueba de tasa de transmisión de datos ha sido explicada en la segunda parte de la metodología. Para el caso de la latencia, será necesario medir el tiempo de ida y vuelta aplicando el comando ping. En las siguientes figuras se muestran los dos resultados posibles (ONO, 2016) después de hacer el ping: en la figura 3.28 se muestra que la respuesta fue exitosa y se han recibido todos los paquetes de información enviados; por el contrario, en la figura 3.29 nos muestra que todos los paquetes enviados se han perdido y se tendrá que verificar cuál fue el nodo dentro de la red de LTE que originó el problema.

```
C:\Documents and Settings\Administrador>ping www.google.es
Haciendo ping a www.google.es [173.194.78.94] con 32 bytes de datos:
Respuesta desde 173.194.78.94: bytes=32 tiempo=35ms TTL=49
Respuesta desde 173.194.78.94: bytes=32 tiempo=33ms TTL=49
Respuesta desde 173.194.78.94: bytes=32 tiempo=34ms TTL=49
Respuesta desde 173.194.78.94: bytes=32 tiempo=44ms TTL=49
Estadísticas de ping para 173.194.78.94:
    Paquetes: enviados = 4, recibidos = 4, perdidos = 0
    (<0% perdidos>),
    Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
        Mínimo = 33ms, Máximo = 44ms, Media = 36ms
C:\Documents and Settings\Administrador>
```

**Figura 3.28** Comando ping cuando responde.

Fuente: (ONO, 2016)

```
H:\>ping www.ono.es
Haciendo ping a www.ono.es [62.42.232.235] con 32 bytes de datos:
Tiempo de espera agotado para esta solicitud.
Estadísticas de ping para 62.42.232.235:
    Paquetes: enviados = 4, recibidos = 0, perdidos = 4
    (<100% perdidos>).
```

**Figura 3.29** Comando ping cuando no responde.

Fuente: (ONO, 2016)

Para LTE, es importante tomar como referencia que la latencia de acceso a la red debe ser menor a 10 [ms], es un tiempo que se mide entre la comunicación del equipo del usuario y del sitio de LTE.

### Disponibilidad

Otra de las causas por las que un usuario decide cambiar de operadora es debido al porcentaje de tiempo en que una celda está disponible. Un sitio es bloqueado cuando el operador debe realizar ciertas modificaciones a la configuración por un tiempo, y una vez que termina de realizar los cambios vuelve a dar de alta el sitio y el servicio de telecomunicaciones se vuelve a establecer. La fórmula utilizada para medir el KPI de disponibilidad es:

$$\text{KPI\_Disponibilidad} = \frac{\text{measurement\_period} - \sum_{\text{cause}} \text{RRU.CellUnavailableTime.[cause]}}{\text{measurement\_period}} \times 100 \quad (8)$$

Donde:

Measurement\_period = Periodo de tiempo como referencia.

RRU.CellUnavailableTime = Tiempo en el que la celda no está disponible.

El KPI de disponibilidad no se medirá en etapa de pre lanzado, se hará cuando el sitio se encuentra lanzado comercialmente

### Movilidad

Este KPI se encarga de mostrar si el proceso de movilidad o *handover* se lleva a cabo de manera exitosa. El desplazamiento de un usuario de una celda a otra se puede dar en los siguientes tres casos: de un sector a otro siendo ambos de un mismo sitio; de un sitio a otro de diferente rango de frecuencia; y de un sitio a otro sitio que opera con otra tecnología como WCDMA o GSM. La fórmula que se utiliza para medir el KPI de movilidad es la siguiente:

$$\text{KPI\_movilidad} = \frac{\text{HO.ExeSucc}}{\text{HO.ExeAtt}} \times \frac{\text{HO.PrepSucc.QCI}_{\text{QCI=x}}}{\text{HO.PrepAttQCI}_{\text{QCI=x}}} \times 100[\%] \quad (9)$$

Donde:

HO.ExeSucc = Evento *handover* exitoso.

HO.ExeAtt = Intento de evento *handover*.

HO.PrepSucc.QCI = Preparación de *handover* exitosa.

HO.PrepAttQCI = Intento de preparación de *handover*.

La fórmula (9) está compuesta de dos partes: preparación y ejecución. En la etapa de preparación se realizan las primeras notificaciones para llevar a cabo un *handover*, dicha etapa se hace en la celda vieja mientras que en la celda nueva se prosigue con la etapa de ejecución, la cual culmina el proceso de movilidad.

En la figura 3.30 (EventHelix, 2017) (Srinivasa y Gajula, 2011) se observa el procedimiento que se realiza para completar un *handover* entre dos sectores de un mismo sitio de LTE (enodeB). Para llevar a cabo un *handover* entre dos sitios de LTE, se sigue otro procedimiento que se muestra en la figura 3.31 (EventHelix, 2017) (Srinivasa y Gajula, 2011) donde el dispositivo S-GW se ve ahora involucrado. En ambas figuras se indican los contadores de eventos de éxito y eventos de intento.

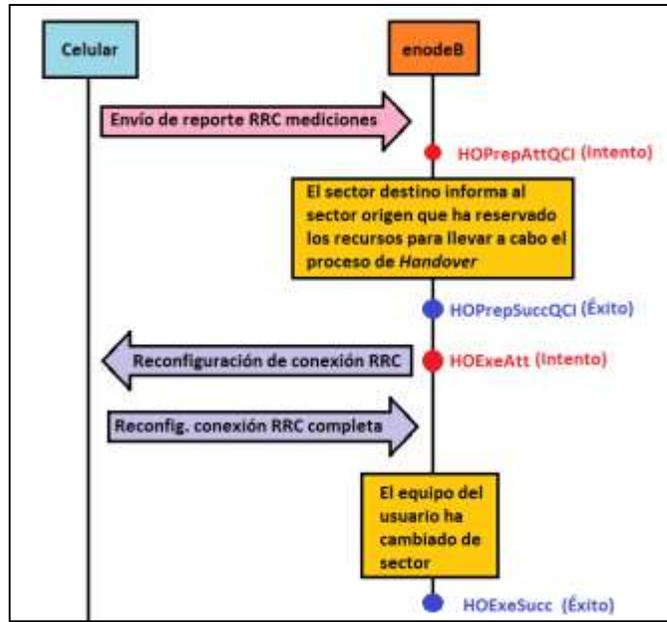


Figura 3.30 Proceso de handover entre sectores de un mismo sitio de LTE.

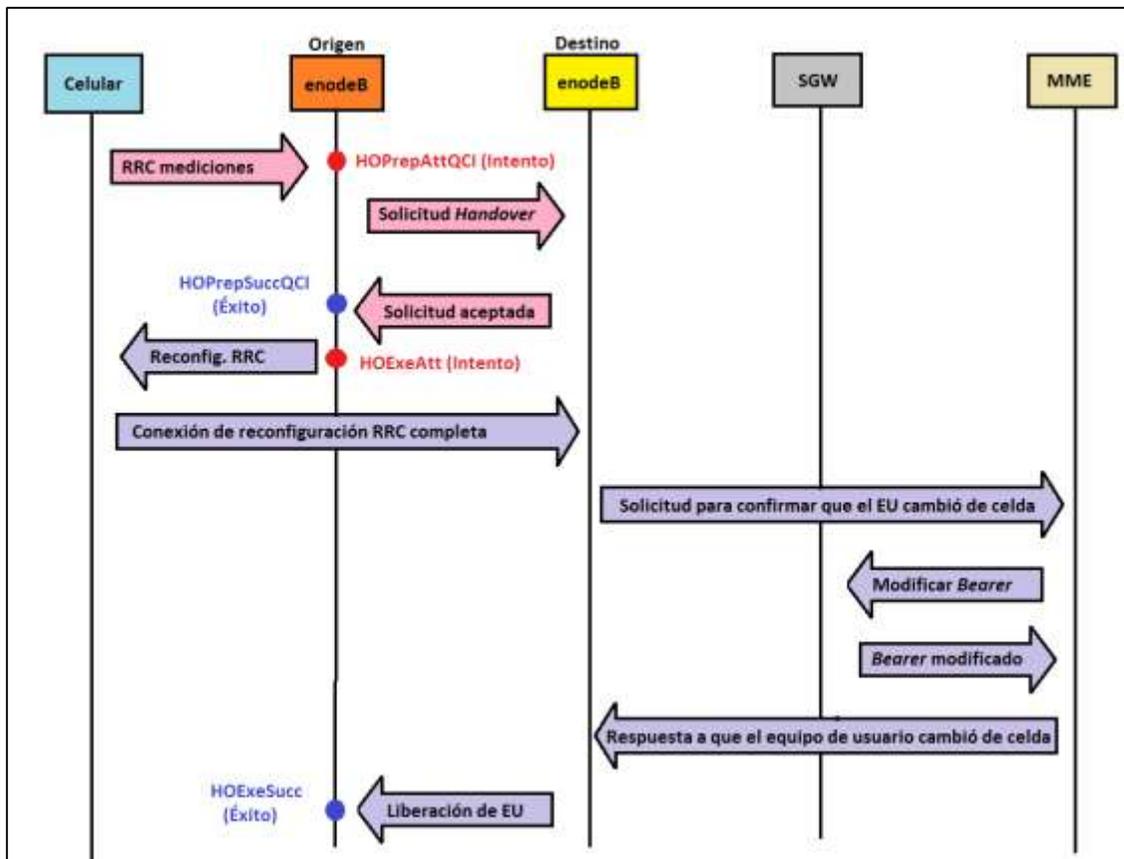


Figura 3.31 Proceso de handover entre dos sitios de LTE.

Una vez que se han recolectado las muestras para los cinco KPIs, se procesan con software de optimización. A la salida se tendrá la mensajería entre el sitio de LTE y el equipo del usuario, donde se podrán analizar protocolos como RRC y NAS, entre otros. De este análisis se podrán detectar problemas en los KPIs mencionados en la tabla 3.6.

Problemas de KPIs	Soluciones propuestas para cada caso
<p>KPI Accesibilidad: La probabilidad de acceso a la celda es muy baja.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Asegurar que la potencia que cubre el área sea suficiente.</li> <li>2. Revisar posibles interferencias de otros sitios de celdas vecinas.</li> </ol>
<p>KPI Retenibilidad: La cantidad de eventos de interrupción de servicio de forma anormal es alta en un periodo de tiempo</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Asegurar que no existen niveles bajos de potencia.</li> <li>2. Si en un proceso de <i>handover</i> se dio la caída del servicio, verificar que el equipo del usuario y el sitio LTE viejo realicen correctamente la búsqueda de sitios LTE nuevos así como verificar el proceso de cambio para saber si el problema está en el sitio LTE viejo o en el nuevo.</li> </ol>
<p>KPI Integridad: Existe una gran cantidad de eventos donde la latencia medida es mayor a los 10 [ms]</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Asegurar que no existan niveles bajos de potencia en el sitio.</li> <li>2. Evaluar el número de clientes conectados. Si el sitio tiene demasiados clientes conectados, se debe considerar aumentar su capacidad aplicando la tecnología MIMO, agregando un sitio nuevo o aplicar una de las técnicas del apartado A.5 del Anexo A.</li> </ol>
<p>KPI Movilidad: Existe una gran cantidad de eventos donde el proceso de <i>handover</i> no se realiza con éxito.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Asegurar que no existan niveles bajos de potencia.</li> <li>2. Verificar que existe cobertura de LTE disponible y sitios de celdas vecinas dispuestos a continuar con el servicio. De lo contrario, verificar que se realizan de manera correcta un <i>IRAT handover</i> hacia otras tecnologías disponibles (3G y 2G).</li> <li>3. Verificar que en el sitio de LTE se hagan los eventos de <i>handover</i> entre sectores tanto en el sentido de izquierda a derecha como de derecha a izquierda.</li> <li>4. Verificar que el equipo del usuario y el sitio LTE realicen correctamente la búsqueda de sitios LTE nuevos.</li> </ol>
<p>KPI Disponibilidad: El porcentaje de tiempo en el que la celda está disponible es muy bajo</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Estudiar los tiempos y días de la semana en los cuales no existe una cantidad elevada de clientes conectados al sitio de LTE. Posteriormente se deben organizar las actividades de mantenimiento y mejora en los días y horas de poco tráfico.</li> </ol>

**Tabla 3.8** Tabla de problemas detectados y soluciones para la etapa tres de la metodología.

Con esta tabla se termina la tercera etapa de la metodología correspondiente a la verificación de los KPIs de un sitio de LTE.

### 3.8 Propuesta final de metodología para verificación de un sitio de LTE en etapa de pre lanzado

En el capítulo 3.1 se hizo la propuesta de que la metodología estuviera organizada en tres etapas: cobertura, tasa de transmisión de datos y KPIs. Los capítulos 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7 se dedicaron a estudiar cada una de las tres etapas, se analizaron con profundidad las características que exige la 3GPP para cada caso, así como los procedimientos sugeridos para realizar las pruebas de medición requeridas en cada etapa.

En la tabla 3.7 se recolectan los procedimientos y recomendaciones para verificar la cobertura, tasa de transmisión de datos y KPIs; por lo que se muestra la metodología final propuesta para verificar un sitio de LTE en etapa de pre lanzado.

#### Propuesta de metodología para verificación de un sitio de LTE en etapa de pre lanzado

Método propuesto:	Prueba de campo ( <i>Drive test</i> ) y análisis de muestras.
Material necesario:	Equipo móvil, scanner, GPS, laptop, camioneta y software para la toma de muestras en campo así como análisis de ellas.
Descripción:	La metodología consiste en realizar tres etapas de medición: verificación de cobertura, verificación de tasa de transmisión de datos y verificación del servicio con KPIs. Para la toma de muestras, se recomienda elegir la marca de scanner compatible con el software de optimización así como éste deberá también ser compatible con el sistema operativo del equipo de usuario. Se recomienda elegir una de las combinaciones propuestas en la tabla 3.1.
Primera etapa de la metodología: verificación de cobertura del sitio de LTE	1. Mediante el establecimiento de una ruta se realizará un recorrido alrededor del sitio de LTE. Para la creación de rutas es importante incluir: la frontera de la cobertura establecida por programas de predicción, rutas distribuidas en el área, rutas que cubran las calles de mayor tráfico así como rutas de lugares donde exista

Segunda etapa de la metodología:  
verificación de tasa de transmisión de datos

- mayor concentración de usuarios. Para crear los recorridos se propone utilizar MapInfo Pro o Google Earth.
2. Después de tener la ruta, se manejará y se tomarán muestras de RSRP, RSRQ y PCIs.
  3. Al tener la recolección de información requerida, todos los archivos de entrada serán procesados mediante software de optimización para obtener como salida mapas de RSRP, RSRQ y PCIS.
  4. Con las Tablas 3.2 y 3.3 se podrá decidir si el sitio opera dentro de los valores recomendados para RSRP y RSRQ. Con los mapas de PCIs y valores de RSSI se podrán asegurar que las áreas de dominio de cada sitio se encuentren correctamente definidas.
  5. En caso de que el sitio presente problemas de cobertura, se podrán llevar a cabo las soluciones propuestas en la sección 3.5.
  6. Después de realizar las correcciones necesarias, se debe verificar de nuevo la cobertura empezando desde el punto 2.
7. Para tomar las muestras, la laptop que realizará la prueba deberá conectarse a un servidor asignado con el cual se establecerá la conexión inalámbrica.
  8. Esta prueba se debe de llevar a cabo tomando muestras estáticas para la capa física y de aplicación (en puntos cercanos al sitio y en puntos donde se espera una buena cobertura), así como muestras de movilidad para la capa física y de aplicación (tomando en cuenta las velocidades que maneja LTE establecidas en la tabla 3.7).
  9. Una vez que se han tomado las muestras, se procesarán mediante software para obtener una colección de datos medidos para los cuatro escenarios.
  10. Se verificará que las pruebas estáticas para la capa física cumplan con la medida establecida por la 3GPP: para el canal de bajada con dos antenas receptoras en el equipo del usuario la tasa de transmisión de datos debe ser de 100 [Mbps], y para el canal de subida con una configuración de una transmisora en el equipo del usuario, la tasa de transmisión de datos deberá ser igual a 50 [Mbps], tomando en cuenta un ancho de banda de 20 [MHz]. Para las pruebas en movimiento de la capa física, se analizarán los escenarios en donde fueron tomados, identificando obstrucciones, calles o carreteras.
  11. Se estudiarán las pruebas estáticas y de movimiento para la capa de aplicación con los protocolos TCP y UDP.
  12. Si los valores de la capa física y los de aplicación no alcanzan los

<p>Tercera etapa de la metodología: verificación del servicio con KPIs</p>	<p>niveles mínimos establecidos por la 3GPP y el operador, se recomienda aplicar las soluciones propuestas al final de la sección 3.6 para aumentar la capacidad.</p> <p>13. Una vez que se han hecho las modificaciones físicas para mejorar o corregir la tasa de transmisión de datos, se debe de realizar de nuevo la verificación del sitio, empezando desde la prueba de cobertura.</p>
	<p>14. Se realizarán pruebas de accesibilidad mediante el establecimiento de llamadas. Se contarán cuantas de ellas se les asignaron recursos de comunicación de manera exitosa.</p> <p>15. Se realizarán pruebas de retenibilidad contando el número de caídas de llamada de manera anormal a partir de las conexiones establecidas exitosamente entre el equipo del usuario y el sitio. Éstas se miden en un tiempo establecido y algunas de las pruebas se tomarán durante el proceso de un <i>handover</i>.</p> <p>16. Se llevarán a cabo pruebas de latencia de conexiones establecidas donde el viaje de la información de ida y vuelta debe ser menor a 10 [ms].</p> <p>17. Se realizarán pruebas de movilidad mediante desplazamientos en el área del equipo del usuario para forzarlo a cambiar de sector en un mismo sitio así como a otros sitios que pueden operar a la misma o diferente frecuencia y a aquellos que operan en diferente tecnología.</p> <p>18. El KPI de disponibilidad no se medirá en etapa de pre lanzado, se hará cuando el sitio se encuentra lanzado comercialmente, estableciendo un tiempo definido y registrando la duración de los bloqueos realizados por el operador.</p> <p>19. Una vez que se han obtenido las muestras de los cuatro KPIs, se verificarán que han alcanzado los porcentajes que el operador ha exigido como mínimos. En caso de existir anomalías en algunos KPIs, se recomienda revisar y llevar a cabo las sugerencias de la Tabla 3.8.</p> <p>20. Después de realizar las correcciones de los KPIs, se deberá verificar el funcionamiento del sitio empezando desde la primera fase de la metodología.</p>

**Tabla 3.9** Metodología para evaluar el funcionamiento de un sitio de LTE en etapa de pre lanzado.

# Conclusiones

---

---

La metodología que se propuso en esta tesis tuvo como fin principal guiar en la recolección de información clave para mostrar los problemas presentes en el funcionamiento de un sitio de LTE en etapa de pre lanzado.

En el capítulo 1 se mostró, con base en gráficas, cómo la tecnología de LTE ha crecido en los últimos años a nivel mundial, por lo que cada vez más las empresas dedicadas a las telecomunicaciones necesitarán de mejores métodos para asegurar el buen funcionamiento de un sitio de LTE.

En el capítulo 2 del marco teórico, se explicaron los primeros intentos para verificar el funcionamiento de un sitio de LTE de acuerdo a las características exigidas por la 3GPP. Actualmente, las empresas han perfeccionado sus técnicas de medición, y cada una tiene su propia metodología de verificación.

En el capítulo 3 se hizo el desarrollo de la metodología de la tesis. Se propusieron los dispositivos e instrumentos de medición, así como software para llevar a cabo las pruebas. Después de ello, se hizo la propuesta en base a tres etapas de verificación: cobertura, tasa de transmisión de datos y KPIs. Durante el análisis de cada etapa, se explicó cómo podrían ser medidas así como las condiciones para validarlas. También se agregaron los posibles problemas que se pudieran detectar, así como las soluciones.

Los anexos fueron agregados para ayudar al lector a comprender los conceptos utilizados en redes celulares y la tecnología de LTE.

Con el fin de conocer el alcance de la metodología se enlistan a continuación los requerimientos de la 3GPP para un sitio de LTE y se resalta en negritas si la metodología propuesta puede verificarlos:

- 1) Tasa de transmisión de datos de 100 [Mbps] en el canal de bajada tomando en cuenta que se tendrán dos antenas de recepción en el equipo del usuario, y 50 [Mbps] en el canal de subida con una antena de transmisión del equipo del usuario, considerando un ancho de banda de 20 [MHz] para ambos casos. **Característica verificada con la metodología.**
- 2) Aumentar la tasa de transferencia de datos en los límites de las celdas, que en todo caso, representan los escenarios más desfavorables. **Característica verificada con la metodología.**

- 3) Incrementar de dos a tres veces más la eficiencia del espectro ofrecida por la tecnología HSDPA y HSUPA. **Característica que no se verifica con la metodología.**
- 4) Flexibilidad en la elección del ancho de banda empleado: 1.25 [MHz], 1.6 [MHz], 2.5 [MHz], 5 [MHz], 10 [MHz], 15 [MHz] ó 20 [MHz]. **Característica física y de configuración del sitio, no se verifica con la metodología.**
- 5) Reducción de la latencia a 10 [ms] para acceso a la red, así como reducir la latencia en los cambios de estado de los equipos celulares en el plano de control. **Característica verificada con la metodología.**
- 6) E-UTRAN debe de soportar la movilidad del usuario a través de la red celular. En cuanto a servicios de tiempo real como la voz, E-UTRAN podrá llevarlos a cabo en el dominio PS (*Packet Switch*) siempre y cuando mantenga al menos la misma calidad de voz realizada por UTRAN a través del dominio CS (*Circuit Switch*). **Característica verificada con la metodología.**
- 7) E-UTRAN debe de soportar una gran variedad de escenarios, principalmente en los límites de cobertura con tamaño igual a 5 [km], 30 [km] y 100 [km], en los cuales es necesario verificar la tasa de transmisión de datos, la eficiencia del espectro así como el correcto proceso de movilidad. **Característica verificada con la metodología.**
- 8) Compatibilidad con sistemas de otras generaciones así como los que no pertenecen a la 3GPP (por ejemplo WLAN y WIMAX). **Característica verificada con la metodología.**
- 9) Contar con la capacidad de implementación de la tecnología MIMO para incrementar la capacidad del sitio: 2x2 ó 4x4 para enlaces de bajada y 2x2 ó 1x2 para enlaces de subida. **Característica física y de configuración del sitio, no se verifica con la metodología.**
- 10) Calidad de servicio garantizada punto a punto. -> **Característica verificada con la metodología.**

Todos los puntos requeridos excepto la eficiencia espectral y las características físicas y de configuración propias del sitio han sido tomados en cuenta. Por lo que la metodología ha sido diseñada bajo lo establecido por la 3GPP y es capaz de mostrar información suficiente para detectar problemas de funcionamiento y verificar que se cumplen los principales requerimientos de 3GPP y del operador.

Por último se hace mención de que para la realización y análisis de los resultados de esta tesis, así como las propuestas de solución fueron basadas en los conocimientos teóricos vistos en las materias del mapa curricular 2006 de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones de la UNAM relacionadas con el funcionamiento de las comunicaciones alámbricas e inalámbricas:

- Análisis de Señales Aleatorias
- Antenas
- Campos y Ondas
- Comunicaciones Digitales

- Dispositivos de Microondas
- Fundamentos de Sistemas de Comunicaciones
- Medios de Transmisión
- Radiocomunicaciones
- Receptores
- Redes de Datos
- Redes Inalámbricas y Móviles
- Sistemas de Comunicaciones Ópticas
- Teoría de la Información y Codificación
- Transmisores

# Fundamentos de los sistemas celulares

---

---

En este anexo se hace mención de los conceptos básicos utilizados en sistemas celulares (Rappaport, 2002) que fueron complementados con los apuntes de la materia de Redes Inalámbricas y Móviles de la carrera de Ingeniería de Telecomunicaciones de la UNAM.

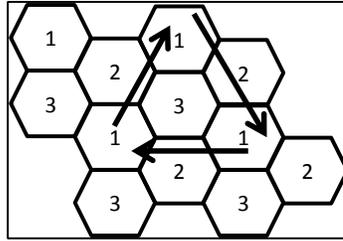
### A.1 Factor de reúso

Cada generación de tecnología celular tiene asignado un rango de frecuencias en las cuales puede operar. Este rango es dividido en canales que son pequeños anchos de banda asignados a cada usuario. La capacidad de un sitio es definida por la cantidad de canales que puede ofrecer en un área.

Para ofrecer servicios de telefonía celular es necesario definir pequeñas áreas geográficas que serán cubiertas por sitios. A estas áreas se les conoce como celdas y para su estudio son dibujadas en forma de hexágonos por su manera precisa y simple de representar la cobertura. Un clúster es un conjunto de celdas y cada celda tiene asignado un grupo de canales diferentes para evitar interferencias entre ellas. Es posible que una celda vecina tenga el mismo grupo de canales que otra siempre y cuando estén lo suficientemente alejadas. Este proceso es conocido como re-uso de frecuencias.

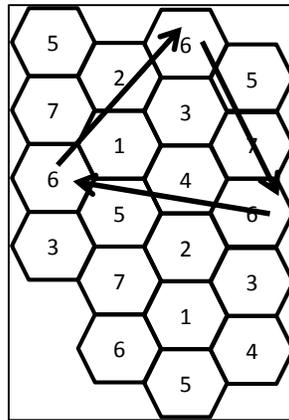
El factor de reúso representa el número de celdas que conforman un clúster y dentro de él no existe repetición de rangos de frecuencia entre sus celdas. Para entender mejor este concepto, se presentan los siguientes ejemplos.

- Un clúster formado por tres celdas tiene un factor de reúso igual a 3. En la figura A.1, el grupo de frecuencias asignado se divide en tres partes, cada parte se asigna de forma ordenada a cada celda. Junto a este clúster se puede colocar otro clúster operando en la misma banda de frecuencias siempre y cuando no se coloquen juntas las celdas que operan en las mismas frecuencias. Cuando se colocan respetando esta regla, se puede observar que las celdas con igual rango de frecuencias forman un triángulo.



**Figura A.1** Ejemplo de un clúster con factor de reuso 3.

- Factor de reuso igual a 7, significa que un clúster está formado por siete celdas. El grupo de frecuencias se divide en siete partes y se asignan de forma ordenada a cada celda. En la figura A.2 se observa el orden de las celdas y el triángulo que se forma.



**Figura A.2** Ejemplo de un clúster con factor de reuso 7.

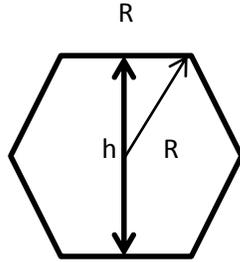
No todos los factores de reuso existen. No es posible tener un valor de reuso de 2 y evitar acomodar celdas de igual rango de frecuencias una al lado de la otra. Para conocer qué factores de reuso son permitidos, es necesario aplicar la siguiente fórmula:

$$FR = i^2 + j^2 + ij \quad (10)$$

Donde  $i$  y  $j$  son números enteros no negativos.

Es importante mencionar que el factor de reuso se encuentra relacionado con la distancia de separación de la siguiente celda que repite el mismo rango de frecuencias. La relación se obtiene de la siguiente manera:

- 1) El hexágono de la figura A.3 representa la cobertura de una celda, tiene un radio de valor  $R$ , está formado por seis lados iguales que miden también  $R$  y la altura se representa con la variable  $h$ . La apotema de dicho hexágono se obtiene con el teorema de Pitágoras:



**Figura A.3** Hexágono que representa la cobertura de una celda.

$$R^2 = \text{apotema}^2 + \left(\frac{R}{2}\right)^2 \quad (11)$$

Despejando la variable apotema se tiene la fórmula 12:

$$\text{apotema} = \frac{R\sqrt{3}}{2} \quad (12)$$

Sabiendo que la altura del hexágono es igual a dos veces apotema, se puede obtener la relación entre el radio y la altura:

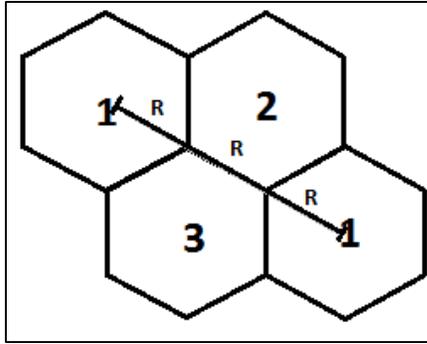
$$\text{altura } (h) = R\sqrt{3} \quad (13)$$

- 2) Dependiendo del factor de reuso que se esté utilizando se puede obtener la relación entre la distancia entre celdas (variable D) y el radio del hexágono (variable R) que representa la celda. Dicha fórmula se expresa a continuación:

$$\left(\frac{D}{R}\right) = \sqrt{FR * 3} \quad (14)$$

Para comprobarla se presentan dos casos:

De la figura A.4, donde se tiene un factor de reuso de 3, la distancia entre dos sitios colocados en el centro de la celda es igual a tres veces el radio de cada hexágono, el cual mide lo mismo en cada celda. Si expresamos esta distancia en múltiplos de  $\sqrt{3}$  se tiene la expresión (15):

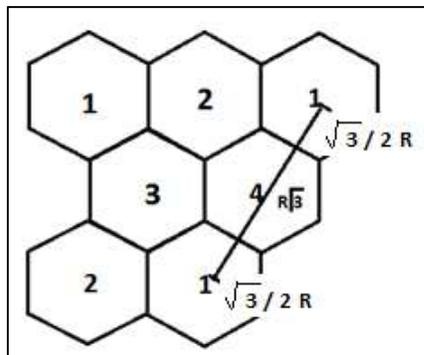


**Figura A.4** Distancia entre sitios para un clúster de factor de reúso 3.

$$\text{Distancia} = 3R = \sqrt{3^2} R = \sqrt{3 * 3} R = \sqrt{FR * 3} R \quad (15)$$

En la figura A.5 se tiene un factor de reúso igual a 4, la distancia entre dos sitios colocados en el centro de la celda operando en el mismo rango de frecuencias es igual a  $2\sqrt{3} R$ . Si se expresa la distancia en múltiplos de  $\sqrt{3}$  se obtiene:

$$\text{Distancia} = 2\sqrt{3} R = \sqrt{2^2 * 3} R = \sqrt{4 * 3} R = \sqrt{FR * 3} R \quad (16)$$



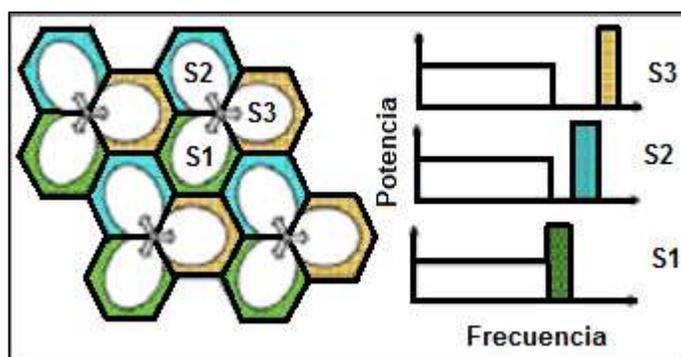
**Figura A.5** Distancia entre sitios para un clúster de factor de reúso 4.

Si se tuviera un factor de reúso 7, utilizando la relación (14) se tiene que la distancia entre dos sitios colocados en el centro de dos celdas es igual a  $\sqrt{7 * 3} R$ .

Este tipo de reúso de frecuencias se conoce como duro y es común encontrarlo en GSM, su característica es que mejora la tasa de transferencia de datos en el borde de la celda porque reduce la interferencia entre celdas pero en el centro de la celda se reduce la eficiencia espectral y la tasa de transmisión de datos debido a la reducción innecesaria de interferencia para los usuarios ubicados en el centro de la celda (Díaz, Urbano y Quintero, 2012).

El factor de reuso de LTE es 1, lo cual quiere decir que cada *eNodeB* (Anexo B) usa todo el ancho de banda disponible, no hay planeación de frecuencias entre celdas. Una de las estrategias para mantener la interferencia entre celdas bajo control es implementar la Coordinación de Interferencia Inter-Celda (ICIC). En este método se puede utilizar, además del reuso duro de frecuencias, el reuso de frecuencias parcial y el reuso de frecuencias suave.

En el reuso parcial de frecuencias, el área de la celda se divide en dos regiones: interior o centro y exterior o borde. El espectro se divide en dos grupos: la primera parte es utilizada por todos los bordes de las celdas y la segunda parte se distribuye entre las *eNodeBs* las cuales aplican el reuso de frecuencias 1 al centro de la celda. En la figura A.6 se muestran en blanco la radio bases de LTE, en el borde se asigna un reuso de frecuencia mayor, es por esto que en la figura los bordes de las celdas se remarcan en diferentes colores (Díaz, Urbano y Quintero, 2012).



**Figura A.6** Reuso de frecuencias parcial.

Fuente: (Díaz, Urbano y Quintero, 2012)

En cuanto al reuso de frecuencias suave, los usuarios del centro de la celda pueden compartir sub bandas con los usuarios ubicados en los bordes de las celdas vecinas (Díaz, Urbano y Quintero, 2012).

## A.2 Relación señal a ruido en un sistema celular

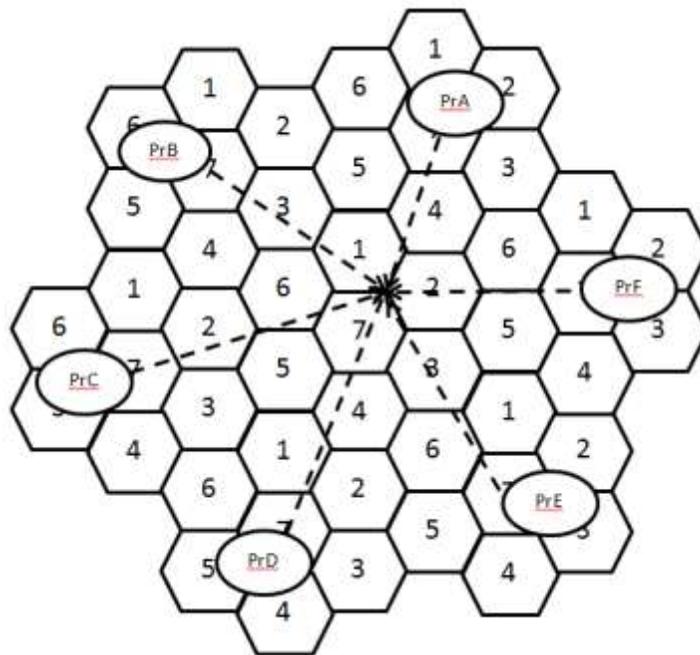
Además de mostrar la relación entre el factor de reuso y la distancia que separa a una celda de otra que opera en las mismas frecuencias, es necesario conocer la relación señal a interferencia de dicho factor de reuso. Primero se hace la distinción entre los siguientes términos:

- Relación señal a ruido más interferencia (SINR): relaciona la potencia de la señal de información y la suma de la interferencia producida por celdas vecinas más el ruido.
- Relación señal a ruido (SNR): relaciona la potencia de la señal de información y el ruido térmico.
- Relación señal a interferencia (SIR): relaciona la potencia de la señal de información y la interferencia proveniente de las celdas vecinas. La relación SIR se define de la siguiente manera:

$$SIR = \frac{\text{Potencia recibida de la señal de información}}{\text{Potencia recibida de las señales de interferencia}} \quad (17)$$

Para calcularla se eligen los lugares donde es posible encontrar las peores condiciones de recepción de una señal en una celda. En un hexágono, si el sitio se coloca en el centro, será en las puntas donde se tendrán las peores condiciones. La distancia entre el sitio y las puntas es igual a R.

La figura A.7 muestra un clúster de factor de reuso 7. En la celda 7 de en medio del clúster se tiene una punta elegida para medir la influencia de interferencia de las celdas vecinas: PrA (potencia recibida del sitio A), PrB (potencia recibida del sitio B), PrC (potencia recibida del sitio C), PrD (potencia recibida del sitio D), PrE (potencia recibida del sitio E), y PrF (potencia recibida del sitio F).



**Figura A.7** Señales de interferencia para un sitio de clúster factor de reuso 7.

Para representar la potencia de recepción se tomará en cuenta el modelo de propagación que relaciona la potencia de transmisión y la distancia que hay hacia las celdas vecinas que interfieren.

$$Pr = \frac{\text{Potencia de transmisión } (Pt)}{(\text{Distancias hacia las celdas que interfieren})^n} \quad (18)$$

La variable n es el exponente de pérdida por trayectoria y su valor depende del tipo de área que se va a cubrir, dichos valores se muestran en la tabla A.1 (Jeison, 2009):

Tipo de área	Valor n
Libre espacio	2
Urbana	2.7 a 3.5
Ubicados en el interior con línea de vista	1.6 a 1.8
Ubicados en el interior con obstrucciones	4 a 6

**Tabla A.1** Tabla de valores para el exponente de pérdida por trayectoria.

Fuente: (Jeison, 2009)

Para un factor de reuso igual a 7 (figura A.7), el SIR se modela de la siguiente manera utilizando la variable de potencia de recepción:

$$SIR = \frac{Pr}{Pr_A + Pr_B + Pr_C + Pr_D + Pr_E + Pr_F} \quad (19)$$

Expresando la fórmula (19) en términos de potencia de transmisión y distancias hacia las celdas de interferencia se tiene:

$$SIR = \frac{\frac{Pt}{R^n}}{\frac{Pt}{(D-R)^n} + \frac{Pt}{(D)^n} + \frac{Pt}{(D)^n} + \frac{Pt}{(D+R)^n} + \frac{Pt}{(D)^n} + \frac{Pt}{(D)^n}} \quad (20)$$

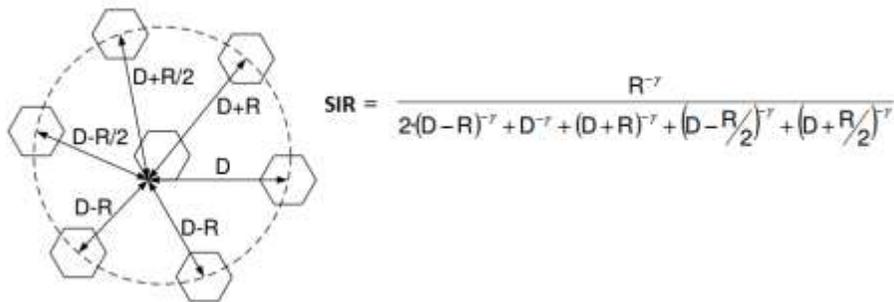
Aplicando simplificaciones matemáticas se tiene:

$$SIR = \frac{R^{-n}}{(D - R)^{-n} + 4(D)^{-n} + (D + R)^{-n}} \quad (21)$$

Dejando la fórmula (21) en términos de distancia sobre radio  $\left(\frac{D}{R}\right)$ , se llega a la expresión (22) conocida también como interferencia co-canal:

$$SIR = \frac{1}{\left(\frac{D}{R} - 1\right)^{-n} + 4\left(\frac{D}{R}\right)^{-n} + \left(\frac{D}{R} + 1\right)^{-n}} \quad (22)$$

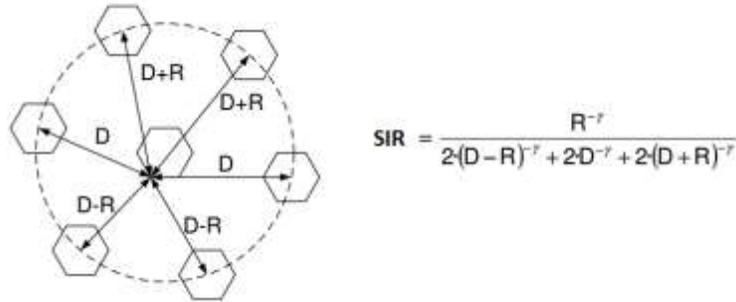
La ecuación (22) puede ser diseñada de otras maneras, es decir, las aproximaciones de distancia entre el equipo de usuario y el sitio son diferentes entre un modelo y otro. La figura A.8, llamada fórmula de Lee (Agüero, 2017), muestra otra fórmula para calcular el SIR, donde  $\gamma$  es el exponente de pérdidas por trayectoria:



**Figura A.8** Fórmula de Lee de interferencia co-canal.

Fuente: (Agüero, 2017)

La fórmula de Lee puede tomar en cuenta otras aproximaciones y quedar ahora como en la figura A.9 (Agüero, 2017):



**Figura A.9** Segunda fórmula de Lee de interferencia co-canal.

Fuente: (Agüero, 2017)

El factor de reuso está relacionado con la interferencia co-canal. Si se utiliza la fórmula (22) y la (14) para calcular los valores de SIR, se tiene la tabla A.2 con los resultados siguientes:

FR	SIR (n = 3) [dB]	SIR (n = 4) [dB]
3	5.39	9.36
4	7.58	12.41
7	11.6	17.9

**Tabla A.2** Tabla de valores SIR para factores de reuso 3, 4 y 7.

En general, las diferentes tecnologías de redes inalámbricas tienen un valor de SIR mínimo aceptable mostrados en la tabla A.3. En el caso de LTE (Raymaps, 2011), se puede observar que su SIR mínimo es mucho menor en comparación con las otras tecnologías porque busca resistir en condiciones más desfavorables para la comunicación.

Tecnología	SIRmin [dB]
GSM	12
CDMA	5
UMTS	-5 a 20
LTE <sup>2</sup>	-0.75 a 15

**Tabla A.3** Tabla de valores SIR mínimos para diferentes tecnologías.

<sup>2</sup> Para áreas urbanas y distancia de 1732 m entre sitios vecinos.

### A.3 Asignación de frecuencias

La asignación de grupos de canales para cada celda se realiza mediante dos tipos de estrategias: fija (FCA) y dinámica (DCA).

- **Estrategia fija o FCA:** En la estrategia fija se asigna un número determinado de canales a una celda. Cuando todos los canales están ocupados y un nuevo usuario desea utilizar un canal, será bloqueado y no podrá utilizar el servicio. Existen otras versiones de la estrategia fija en las cuales se permite que las celdas vecinas presten canales sin interferirlas.
- **Estrategia dinámica o DCA:** En esta estrategia no se asignan canales fijos a una celda, sino que al momento de que un usuario requiera hacer uso de un canal, el transmisor o la estación base pide uno a la central y ella lo asigna mediante un algoritmo que toma en cuenta la distancia entre celdas que utilizan los mismos canales.

### A.4 Proceso de *handover*

Durante la realización de una llamada, el usuario puede estar desplazándose de una celda a otra, por lo que se verá obligado a dejar el canal de la celda vieja para tomar otro de la celda nueva y continuar la sesión de comunicación. Este proceso es conocido como **Handoff** o **Handover** y se encarga de elegir la celda nueva mediante evaluaciones de parámetros que le permitan conocer si la celda cumple con los requerimientos necesarios para seguir llevando a cabo la llamada. El cambio debe de realizarse a modo de que el usuario no pueda percibirlo.

Para realizar un proceso de *handover*, es necesario establecer los parámetros y los valores mínimos que debe de cumplir una señal para considerarse óptima. Cuando se detecta que la señal de comunicación empieza a degradarse, el equipo del usuario comenzará a tomar más mediciones en un periodo de tiempo considerable: si la caída de los niveles es momentánea debido a las condiciones del ambiente y enseguida mejora, el proceso de *handover* no se realiza. De lo contrario, el equipo seguirá tomando más muestras en un tiempo establecido y si la degradación continúa, comenzará a buscar un sitio candidato que continúe la sesión. Existen dos tipos de *handover*:

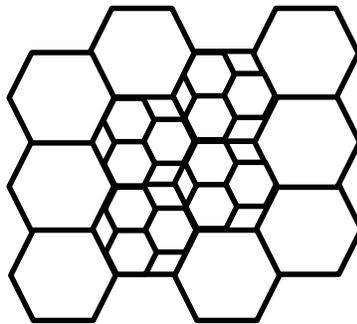
- **Hard-handover.** Utiliza un solo canal: el equipo del usuario se encuentra utilizando un canal conectado a la celda vieja, cuando pasa a la celda nueva, se desconecta y se conecta a ella. GSM, FDMA, TDMA y LTE aplican este procedimiento.
- **Soft-handover.** Se utilizan dos canales: uno conectado a la celda vieja y el otro a la celda nueva. El proceso se realiza de manera simultánea en ambos canales y no

existen interrupciones en la comunicación. La desventaja se encuentra en su implementación que es compleja. CDMA y WCDMA utilizan este tipo de *handover*.

## A.5 Estrategias de aumento de capacidad y cobertura

- División celular (primera estrategia)

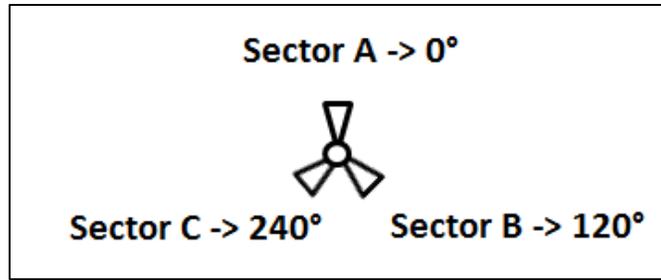
Existen celdas ubicadas en zonas urbanas donde se tienen áreas más pobladas que otras. Por tanto, en dichas zonas será necesario aumentar la capacidad mediante la técnica de división celular, la cual consiste en subdividir las celdas en otras más pequeñas que cuenten con su propio sitio, observar figura A.10 (Quintero, 2017). Debido a que estos sitios se encuentran más cerca unos de otros, es importante mantener controlada la altura de las antenas así como la potencia de transmisión. Esta técnica permite incrementar la capacidad en el área reduciendo el radio de la celda pero manteniendo la relación D/R.



**Figura A.10** Método de división celular para aumentar la capacidad.

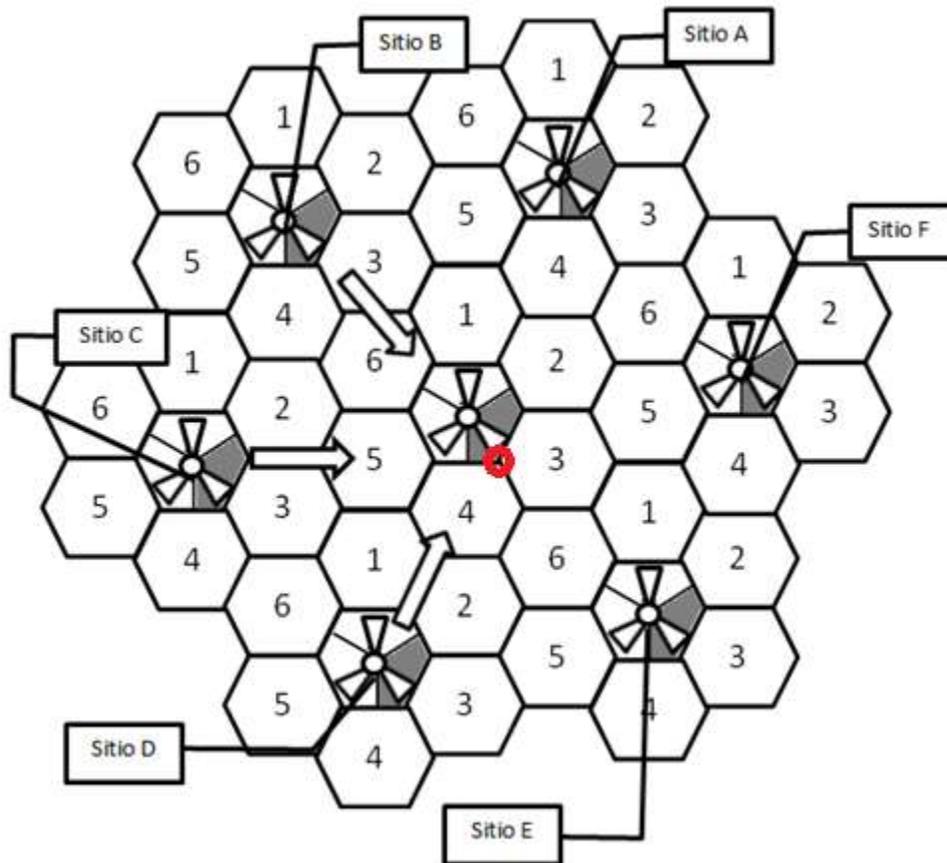
- Sectorización (segunda estrategia)

Este método aumenta la capacidad celular sin modificar el radio de la celda y la potencia de transmisión. Consiste en incrementar la relación SIR al reemplazar las antenas omnidireccionales de la estación base por antenas direccionales. Cada antena direccional se encontrará cubriendo una parte de la celda conocida como **sector**. La interferencia que experimenta un sector con otro es menor que la de una celda por otra celda. Existen diferentes tipos de sectorización dependiendo la apertura de haz de la antena direccional: puede ser de  $120^\circ$  en cuyo caso la celda y la banda de canales asignados al transmisor se divide en tres partes, como en el sector en la figura A.11; o puede ser con apertura de haz igual a  $60^\circ$ , donde la celda es dividida en 6 sectores. En cuanto a la potencia de transmisión, tendrá que mantenerse igual, es decir, no se debe de reducir.



**Figura A.11** Método de sectorización para aumentar la capacidad.

En la imagen A.12 se puede observar un ejemplo de sectorización en un clúster. Se tiene un factor de reúso igual a 7. Cada celda se divide en tres sectores: el sector A apunta a 0°, sector B apunta a 120° y el sector C apunta a 240°. Este patrón se repite en la primera ronda alrededor del sitio.



**Figura A.12** Método de sectorización para un clúster de factor de reúso 7.

Si queremos conocer el valor de SIR del sector B de la celda del centro (indicado en un círculo rojo), hay que tomar en cuenta las interferencias provocadas por los sectores B

de las celdas vecinas: para este cálculo las interferencias de los sitios A, D, E y F se consideran mínimas y por tanto no se contarán; mientras que el sector B de los sitios B y C sí interfieren. Matemáticamente esto se expresa en la ecuación (23):

$$SIR_{sectorB} = \frac{\text{Potencia recibida de la señal}}{\text{Potencia recibida de 2 celdas vecinas de la primera ronda}} \quad (23)$$

La ventaja de utilizar el método de sectorización es que la interferencia disminuye aumentando el valor de SIR. Sin embargo, el usuario está más expuesto a los procesos de *handover* por los cambios de un sector a otro.

## A.6 Tráfico en un sistema celular

Para conocer la cantidad de canales asignados a una radio base, se hacen estudios para medir de manera aproximada la cantidad de usuarios a los cuales se les dará servicio así como el tiempo que se tomarán en utilizar dicho canal.

Dada una N cantidad de canales asignados a una celda, se considera probabilidad de bloqueo ( $P_b$ ) aquella situación en la que un nuevo usuario se bloqueará debido a que todos los canales se encuentran ocupados. La cantidad de tráfico producido por usuario ( $A_u$ ) se define en la ecuación (24):

$$A_u [\text{Erlangs}] = \frac{\lambda}{u} = \frac{\text{número de intentos de llamadas}}{\text{duración promedio de llamadas}} \quad (24)$$

Se puede observar que la unidad de tráfico se expresa en *Erlangs* (en memoria del matemático danés *Agner Krarup Erlang* que estudió la manera en que los servicios podían ser distribuidos en cierto número de personas). Los *Erlangs* representan la cantidad de tráfico que contiene un canal ocupado por un minuto, o por una hora, entre otros. Así, si un canal está ocupado 15 min, se dice que el canal tiene 0.25 *Erlangs* de tráfico en una hora.

La cantidad de tráfico producida por un sistema celular (A) es igual al tráfico que produce cada usuario ( $A_u$ ) por el número de usuarios contenidos en dicho sistema (k):

$$A [\text{Erlangs}] = k * A_u \quad (25)$$

Si el tráfico se distribuye por igual en todos los canales, se puede calcular la intensidad de tráfico por canal ( $A_c$ ):

$$A_c [\text{Erlangs}] = \frac{(k * A_u)}{N} \quad (26)$$

El valor de  $k$  (número de usuarios en el sistema) puede obtenerse mediante la multiplicación de la densidad de usuarios ( $\rho$ ) por el área del hexágono. Dependiendo de la región, se tienen en la tabla A.4 los valores de densidad para cada tipo de área (Rappaport, 2012):

Región	Densidad de usuarios (usuarios / km <sup>2</sup> )
Rural	2
Sub - urbana	100
Urbana	1000

**Tabla A.4** Tabla de densidad de usuarios dependiendo de la región.

Fuente: (Rappaport, 2012)

El área del hexágono se obtiene con la ecuación (27):

$$\text{Área} = 3 \sqrt{3} \frac{R^2}{2} = 2.6 R^2 [m^2] \quad (27)$$

$R$  es el radio del hexágono, por lo que el número de usuarios se define como:

$$k = \rho * 2.6 * R^2 [\text{usuarios}] \quad (28)$$

Existen dos tipos de modelos estadísticos utilizados en un sistema celular:

- 1) Sistema de bloqueo de llamadas. Este sistema consiste en establecer que un usuario al realizar una llamada solicita un canal, y si está disponible, se le asigna de manera inmediata. En caso contrario, el usuario se bloqueará y no tendrá acceso al servicio. Este comportamiento queda representado por una distribución de *Poisson*. La probabilidad de uso de un canal por un usuario ( $A$ ) tiene un comportamiento exponencial y siempre hay un número  $N$  finito de canales

disponibles. La probabilidad de bloqueo ( $P_b$ ) es conocida como *Erlang B* con la ecuación (29):

$$P_b = \frac{\frac{A^N}{N!}}{\sum_{n=0}^N \frac{A^n}{n!}} \quad (29)$$

Los *Erlangs B* se pueden encontrar ya calculados, en la tabla A.5 se muestran algunos valores (Rappaport, 2002):

↑ **Número de canales (N)**      **Probabilidad de bloqueo ( $P_b$ )** ↑

Number of Channels C	Capacity (Erlangs) for GOS			
	= 0.01	= 0.005	= 0.002	= 0.001
2	0.153	0.105	0.065	0.046
4	0.869	0.701	0.535	0.439
5	1.36	1.13	0.900	0.762
10	4.46	3.96	3.43	3.09
20	12.0	11.1	10.1	9.41
24	15.3	14.2	13.0	12.2
40	29.0	27.3	25.7	24.5
70	56.1	53.7	51.0	49.2
100	84.1	80.9	77.4	75.2

↓ **Cantidad de tráfico en un sistema celular (A)**

**Tabla A.5** Tabla de Erlangs B.

Fuente propia basada en (Rappaport, 2012)

- 2) El segundo modelo estadístico consiste en tomar en cuenta un búfer que almacena las solicitudes de canales en una fila y las mantiene en espera si no hay canales disponibles. Las llamadas se bloquearán cuando el tiempo definido de espera se expira. La probabilidad de que una solicitud de servicio no tenga acceso inmediato al sistema se determina con *Erlang C* mostrado en la ecuación (30), donde N es el número de canales, A la cantidad de tráfico en un sistema celular y  $P_b$  probabilidad de bloqueo:

$$Pb [espera > 0] = \frac{A^N}{A^N + N! \left(1 - \frac{A}{N}\right) \sum_{n=0}^{N-1} \frac{A^n}{n!}} \quad (30)$$

La probabilidad de que una llamada en espera supere cierta cantidad de tiempo se calcula con la ecuación (31) donde se ha agregado la variable  $u$  que representa la cantidad de tiempo que dura una llamada:

$$Pb [espera > t] = Pb [espera > 0] \exp\left(-\frac{(N - A)t}{\left(\frac{1}{u}\right)}\right) \quad (31)$$

El tiempo promedio de espera ( $D$ ) para las llamadas en fila de espera se calcula con la ecuación (32):

$$D = Pb [espera > 0] \left(\frac{1/u}{N - A}\right) \quad (32)$$

## A.7 Modelos de propagación en las redes inalámbricas

Una señal electromagnética que viaja de manera inalámbrica sufre cambios debido a la distancia que debe recorrer entre el transmisor y el receptor, por las diferentes trayectorias que toma y la presencia de objetos como árboles y edificios. Un modelo del canal representa matemáticamente este medio y permite calcular la potencia de la señal en la recepción. El resultado se obtiene de la convolución de la señal transmitida con la respuesta al impulso del canal en el dominio en el tiempo. Sin embargo, debido a su complejidad en el tiempo, estos cálculos se realizan en el dominio de la frecuencia, a lo cual se obtendría la ecuación (Jain, 2007):

$$y(f) = [H(f) * x(f)] + n(f) \quad (33)$$

La variable  $y(f)$  representa la señal en la recepción,  $H(f)$  representa el canal de transmisión,  $x(f)$  es la señal de transmisión y  $n(f)$  es el ruido. Los tres factores que influyen en la respuesta del canal son (Jain, 2007):

- Pérdidas en la potencia de la señal cuando viaja a cierta distancia. La fórmula empírica general utilizada para la atenuación de la señal es:

$$Pr = Pt Po \left[ \frac{do}{d} \right]^\alpha \quad (34)$$

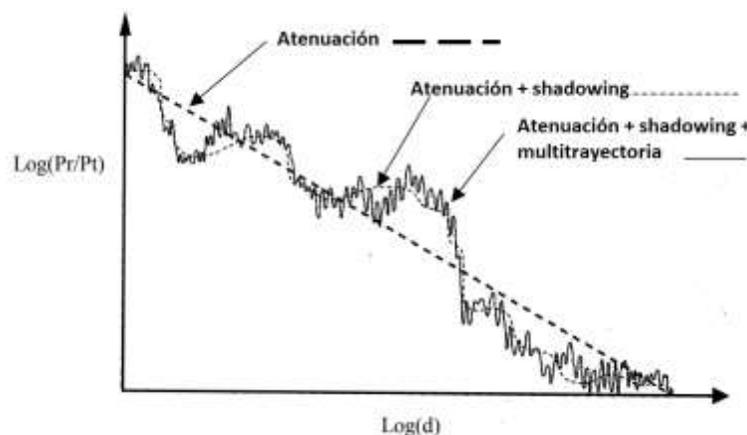
Donde  $Po$  es la potencia medida en la distancia  $do$  y  $\alpha$  es el exponente de atenuación. El canal más fácil de modelar es aquel donde se tiene la línea de vista despejada entre el transmisor y el receptor. Para modelarlo se utiliza la siguiente ecuación:

$$Pr = G * Pt \left[ \frac{\lambda}{4 * \pi * d} \right]^2 \quad (35)$$

Donde  $Pt$  es la potencia transmisora,  $G$  es el producto de las ganancias de la antena transmisora y la antena receptora,  $\lambda$  es la longitud de onda,  $d$  es la distancia,  $Pr$  es la potencia en la recepción.

- Fluctuaciones lentas o FL (en inglés *slow* o *shadow fading*), que son pérdidas debidas a desplazamientos lentos entre obstáculos como árboles y edificios. Se modela con una distribución gaussiana o normal (*log normal*).
- Fluctuaciones rápidas o FR (en inglés *fast fading*), que son variaciones a gran velocidad en pequeñas distancias. Se emplea el modelo *Rayleigh* para las celdas grandes y modelo *Ricean* para celdas pequeñas.

La figura A.13 (Jain, 2007) muestra los tres factores que influyen en la respuesta del canal de manera gráfica y sus combinaciones.



**Figura A.13** Comportamiento del canal inalámbrico.

Fuente propia tomada de (Jain, 2007)

Los modelos de probabilidad que representan la degradación de la señal a lo largo de la distancia se clasifican en tres escalas (Mehmood y Aslam, 2009):

- Modelo de propagación en gran escala, donde la medida de la distancia entre el transmisor y el receptor está en orden de cientos o miles longitudes de onda.
- Modelo de propagación en mediana escala, donde la medida de la distancia entre el transmisor y el receptor está en orden de decenas o cientos de veces de longitud de onda. En este modelo se tiene una distribución log-normal y equivale a un canal con respuesta al impulso, compuesto de una serie de trayectorias  $n$  que llegan al receptor en tiempos diferentes ( $\tau_n$ ), con amplitudes diferentes ( $a_n$ ) y fases distintas ( $\varphi_n$ ):

$$h(t, \tau) = \sum_n a_n(t) e^{j\varphi_n(t)} \delta(\tau - \tau_n) \quad (36)$$

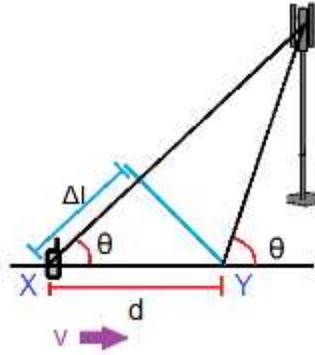
- Modelo de propagación en pequeña escala. Este modelo se utiliza para mostrar las variaciones rápidas que sufre la señal debido al movimiento del equipo del usuario en pequeñas distancias de longitud de onda. La descripción más común es la distribución *Rayleigh*, que representa la suma de amplitudes de un gran número de componentes con fases uniformemente distribuidas en el intervalo de 0 a  $2\pi$ ;  $\sigma$  es la raíz cuadrada de la señal medida en el receptor y  $\alpha$  es la amplitud.

$$f_\alpha(\alpha) = \frac{\alpha}{\sigma^2} e^{-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}} \quad \alpha \geq 0 \quad (37)$$

Cuando además de las señales multitrayectoria se tiene presente la señal de línea de vista despejada, se debe modelar una distribución *Ricean*.  $I_0$  es la función de *Bessel* de primer tipo con orden cero,  $\alpha$  y  $\rho$  son amplitudes, sólo que  $\rho$  corresponde a la amplitud de la señal de línea de vista despejada.

$$f_\alpha(\alpha) = \frac{\alpha}{\sigma^2} I_0\left(\frac{\alpha\rho}{\sigma^2}\right) e^{-\frac{(\alpha^2+\rho^2)}{2\sigma^2}} \quad \alpha \geq 0 \quad (38)$$

Debido a que la velocidad del usuario afecta en la fase de las señales, se tiene una frecuencia *Doppler* que también se toma en cuenta. El efecto *Doppler* es el desvío en la frecuencia del transmisor debido al movimiento entre éste y el receptor. Cuando el receptor se mueve hacia el transmisor cada onda que recibe llega más rápido a comparación del tiempo en que llegan si el receptor estuviera quieto (USNA, 2017). En la figura A.14 (Hasan, 2012) se puede observar un equipo del usuario que se mueve de manera constante a una velocidad ( $v$ ), a lo largo del segmento X y Y.



**Figura A.14** Geometría del efecto Doppler.

Los tramos de distancia que se recorren entre el transmisor y el receptor se representan con  $\Delta l$ , el cual equivale a (Hasan, 2012):

$$\Delta l = d * \cos\theta = v \Delta t \cos\theta \quad (39)$$

$\Delta t$  es el tiempo que se toma el equipo móvil en recorrer el segmento de X a Y. El cambio de fase se define con la variable  $\Delta\phi$  que se calcula como (Blaunstein y Christodoulou, 2007):

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d * \cos\theta = \frac{2\pi}{\lambda} v \Delta t \cos\theta \quad (40)$$

La longitud de onda de la frecuencia del transmisor se representa con  $\lambda$ . El desvío de frecuencia se calcula con la ecuación (Blaunstein y Christodoulou, 2007):

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} * \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{v}{\lambda} \cos\theta \quad (41)$$

Si  $\theta$  es igual a cero, la diferencia de frecuencia queda:

$$\Delta f = \frac{v}{\lambda} \quad (42)$$

La frecuencia final que recibe el equipo del usuario es:

$$f' = f_{transmisor} + \Delta f \quad (43)$$

Si el transmisor, el receptor o incluso los objetos interferentes en entre ellos dos se desplazan, el comportamiento del medio cambia. El tiempo coherente es el tiempo en el

que se puede considerar que las características del canal son constantes. El ancho de banda coherente es el rango de frecuencias en que las características del canal son similares.

El retraso al que llega la última copia de la señal que aún percibe el receptor se le llama dispersamiento de retardos ( $\tau_{max}$ ). Entre más grande sea este valor, el canal es más disperso. Por lo común este valor se expresa por medio de valor cuadrático medio (rms).

## A.8 Probabilidad de la señal en partes específicas de una celda

Para conocer la probabilidad de que el valor de la señal sea mayor a uno requerido en ciertas partes de la celda, las fluctuaciones rápidas no se consideran debido a que tienen amplitudes pequeñas; en cambio, las fluctuaciones lentas tienen gran amplitud y su impacto es mayor. Para modelar la probabilidad, se utiliza una distribución gaussiana. La potencia promedio ( $P_{prom}$ ) se calcula con la ecuación (44):

$$P_{prom} [dB] = \frac{\text{Suma de las potencias medidas}}{\text{Número de mediciones}} \quad (44)$$

La función de densidad de probabilidad es:

$$f(p) = \frac{e^{-\frac{(p-p_{prom})^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}; \quad \sigma^2 \text{ es la varianza y } p \text{ es la potencia de la señal} \quad (45)$$

La probabilidad de que la señal sea mayor al valor aceptable ( $p_0$ ) es igual a la integración de la densidad de probabilidad:

$$P[p \geq p_0] = \int_0^{\infty} \frac{e^{-\frac{(p-p_{prom})^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} dp \quad (46)$$

Para solucionar la función anterior se aplica la función erf(x) o de error que dice:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx; \quad \text{donde } x = p - p_{prom} \quad (47)$$

La probabilidad de que la señal tenga una potencia mayor a  $p_0$  es igual a:

$$P[p \geq p_0] = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{p_0 - p_{prom}}{\sqrt{2}\sigma}\right) \quad (48)$$

Los valores de la función  $\operatorname{erf}(x)$  se obtienen de tablas. Con esta función es posible conocer la cantidad de teléfonos que funcionarán, por ejemplo, en la periferia de la celda.

# Características de LTE

---

---

Con el fin de comprender el funcionamiento de un sitio de LTE se dedica este anexo a la explicación de las características principales de dicha tecnología. A continuación se definen los siguientes términos para facilitar la comprensión del capítulo.

**Ancho de banda por canal:** rango de frecuencias que un canal utiliza en servicios de bajada o en servicios de subida.

**Arquitectura:** conjunto de dispositivos, interfaces físicas (nodos), protocolos y técnicas necesarias para llevar a cabo la comunicación.

**Banda de operación:** conjunto de frecuencias que dicha tecnología celular utiliza del espectro radioeléctrico.

**Codificación:** es la conversión de la información que originalmente se tiene de manera analógica a sistema binario.

**Estructura de canales:** se refiere a la manera de transportar la información entre capas por medio de canales.

**Interfaz aérea:** es la estructura del enlace de datos entre el sitio y el equipo del usuario. Junto con el método de acceso, la interfaz asigna recursos de manera eficiente a los usuarios y agrega información de control.

**Método de acceso:** es la técnica utilizada para dividir de manera eficiente el espectro disponible.

**Modulación:** proceso que permite adecuar la señal de información (moduladora) al medio de transmisión mediante la modificación sistemática de uno de los parámetros de otra señal conocida como portadora (como la amplitud, frecuencia o fase).

**Movilidad:** establece los procesos necesarios (como mensajería y estados) para mantener la llamada de un usuario que se encuentra desplazándose de un lugar a otro.

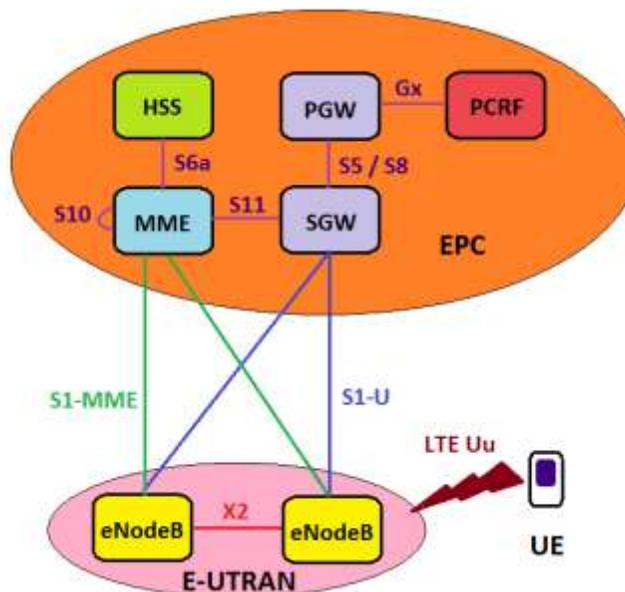
**Tasa de transmisión:** cantidad de bits exitosamente transmitidos en una dirección (sea de bajada o de subida) por unidad de tiempo.

## B.1 Arquitectura (EPC y EUTRAN)

De acuerdo a la figura B.1 (Holma y Toskala, 2009) se observa que la arquitectura de LTE está formada de dos capas lógicas:

- **Capa de acceso o E-UTRAN:** donde se controla el acceso de los usuarios a los recursos de la red. Se llevan a cabo los procesos de encriptado y des-encriptado (que por motivos de seguridad la información se vuelve no legible y solo es entendible mediante una clave que solo el transmisor y el receptor conocen) así como los procesos de compresión y descompresión (reducción y restauración del tamaño de los datos). Físicamente esta capa incluye los equipos celulares, las radio bases que en LTE se denominan *eNodeBs*, y las interfaces *S1* y *X2*. En la figura B.1 es mostrada en la parte inferior.
- **Capa de núcleo o core EPC:** se encarga de re-direccionar rápidamente grandes cantidades de tráfico hacia otras redes de datos externas. Con esta capa es posible llevar a cabo la movilidad del usuario en la red. Entre los dispositivos que la conforman están: MME, HSS, PGW, SGW y PCRF. En la figura B.1 es mostrada en la parte superior.

El término en inglés EPS es utilizado en LTE para nombrar al conjunto de ambas capas.



**Figura B.1** Arquitectura de la tecnología LTE.

Fuente propia basada en (Holma y Toskala, 2009)

## B.2 Función de los dispositivos que conforman LTE/SAE

MME (*Mobility Management Entity*): se encarga de las funciones de movilidad. También realiza tareas como el establecimiento de conexión del equipo del usuario para las llamadas (en inglés *user equipment* – UE); seguridad (autoriza e identifica cada usuario en la red); administra la información necesaria para permitirle a un usuario que utilice la capa de acceso; y administra los equipos en estado inactivo (en inglés *idle mode*, el cual el equipo del usuario está encendido pero no está llevando a cabo una llamada).

PCRF (*Policy and Charging Rules Function*): este servidor establece las reglas y condiciones para asignar recursos a los usuarios. Se encuentra configurado por las operadoras.

HSS (*Home Subscriber Server*): es la base de datos que contiene la información necesaria para que el usuario continúe suscrito a la red y siga haciendo uso de ella (parámetros de identificación y localización).

P-GW (*Packet Data Network Gateway*): este *router* establece la comunicación entre la red local hacia la red externa. Dentro de sus características se encuentra la calidad de servicio (QoS), la cual permite un control sobre los flujos de tráfico de bajada estableciendo prioridades entre diferentes tipo de información.

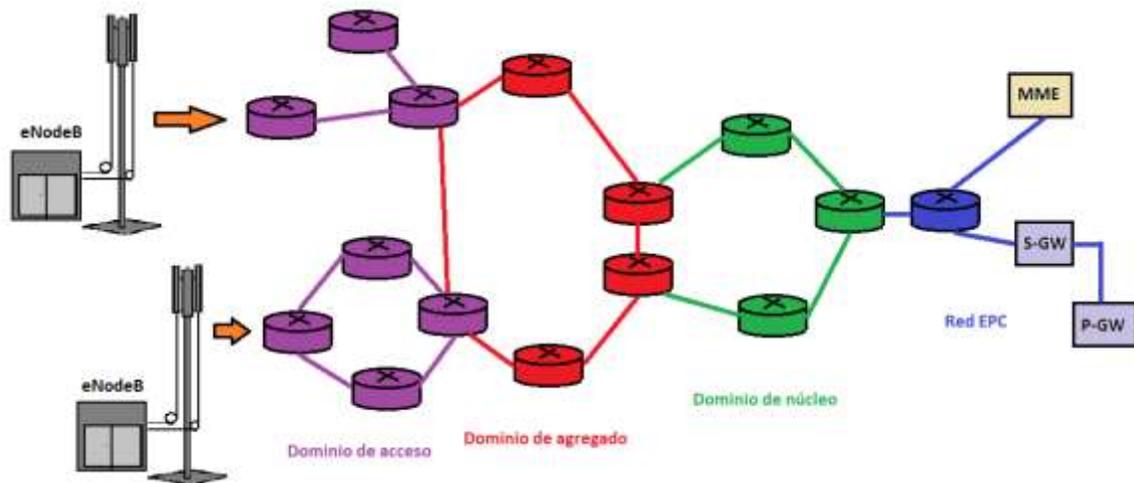
S-GW (*Serving Gateway*): se encarga de enviar la información del usuario al *router* P-GW correcto. También se tienen los procesos de movilidad en un mismo S-GW o en otro P-GW. Si se trata de interceptar comunicaciones bajo un fin legal, el S-GW cuenta con esta función.

eNodeB (*evolved Node B*): este término es utilizado en LTE para hacer referencia al sitio. Realiza funciones de transmisión y recepción de información del usuario hacia una o más celdas. Tiene conexión con la capa de núcleo mediante la interfaz S1 y hacia otras *eNodeBs* mediante la interfaz X2. Las *eNodeBs* tienen funciones relacionadas con la capa física: controlan y asignan recursos de su misma celda; controlan la movilidad en el estado activo de los equipos; apoyan en la seguridad con el uso de cifrado y accesos aleatorios en las señalizaciones iniciales cuando el equipo del usuario tiene acceso a la red; realizan retransmisiones de datos cuando se detecta pérdida de información y monitorean los parámetros del equipo del usuario mediante mediciones.

### B.3 Red Backhaul LTE

La red *backhaul* LTE es la red de transporte que se encuentra en la capa de acceso donde se conectan los *eNodeBs* con los elementos que pertenecen a la capa de núcleo. En la figura B.2 se muestran los tres dominios que componen la red *backhaul* de LTE (Howard, 2011). Las características principales de cada dominio son (Iquall Networks, 2014):

- Dominio de acceso: se conecta a las *eNodeBs* por medio de cable coaxial, fibra óptica o microondas y se divide en primera y segunda milla. Se pueden encontrar técnicas de acceso de fibra óptica como GPON (basado en el protocolo IP y diseñado por la UIT-T), EPON (basado en Ethernet con los protocolos PDH y DSL y definido por la IEEE), o BPON (basado en el protocolo ATM y diseñado por FSAN) (Millán, 2007).
- Dominio de agregado: conexión que se compone principalmente de fibra óptica y se pueden encontrar las topologías de anillo o *mesh*. Se compone de redes IP, MPLS, Ethernet y TDM.
- Dominio de núcleo: se conecta a los dispositivos de la red EPC por medio de una red IP o MPLS.



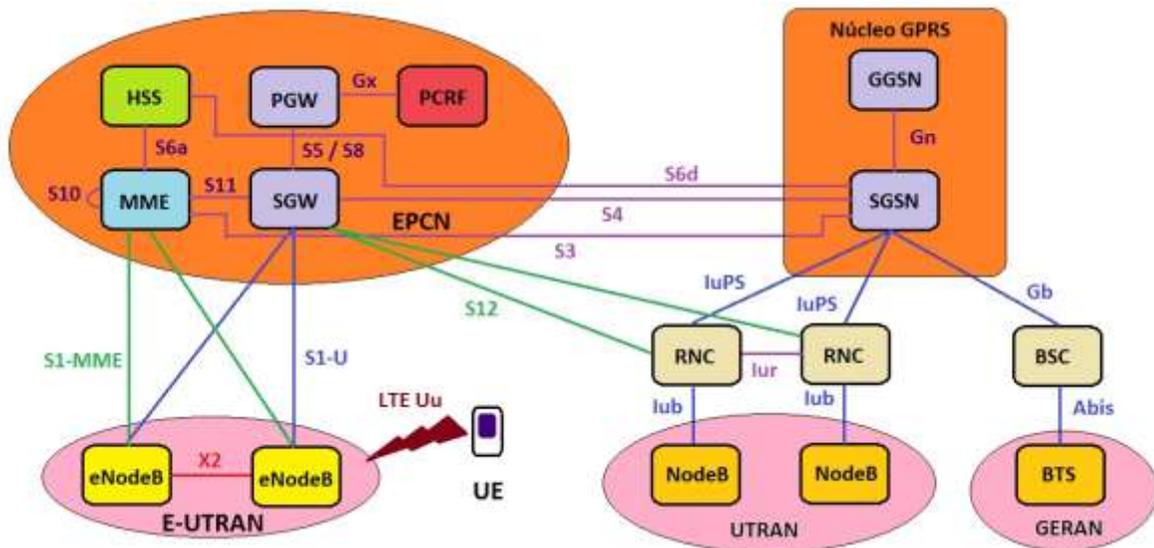
**Figura B.2** Red backhaul LTE.

Fuente propia basada en (Howard, 2011)

## B.4 Servicio de voz en LTE

LTE sólo incluye servicios de datos basados en la tecnología de paquetes conmutados (PS). Para que LTE pueda cubrir un servicio de voz, existen las siguientes alternativas:

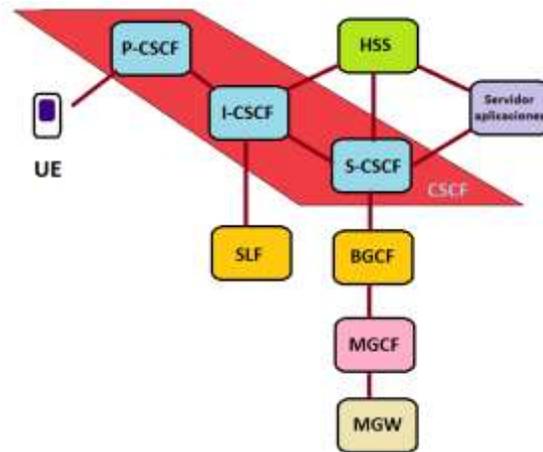
- 1) Circuito alternativo conmutado o *Circuit Switched Fallback* (CSFB). Esta alternativa transfiere los servicios de voz que el usuario de LTE desea realizar a las redes de 2G ó 3G. Si el usuario se encontraba utilizando además una conexión de datos, es probable que se degrade si pasa a una cobertura de 3G, o desaparezca si pasa a una cobertura de 2G, debido a que esta tecnología no soporta servicios de datos. En la figura B.3 (Leopedrini, 2015) se observa cómo LTE es conectada con las tecnologías UTRAN y GERAN mediante el dispositivo SGSN (el cual da acceso a los dispositivos móviles a la red de datos) que pertenece al núcleo de GPRS. También existe una conexión directa entre el SGW y los RNC (los cuales gestionan recursos y controlan las NodeBs) de 3G.



**Figura B.3** Arquitectura CSFB de LTE.

Fuente: (Leopedrini, 2015)

- 2) Voz sobre LTE (VoLTE). Esta alternativa usa la red de Subsistema IP Multimedia o *IP Multimedia Subsystem* (IMS), donde el servicio de voz se da completamente con el protocolo IP. IMS es una red que surgió antes de LTE (en la Versión 5 de la 3GPP) diseñado bajo el concepto de convergencia entre diferentes tipos de acceso, tipos de servicio, funciones para el control de aplicaciones, telefonía y entrega de datos.



**Figura B.4** Arquitectura IMS.

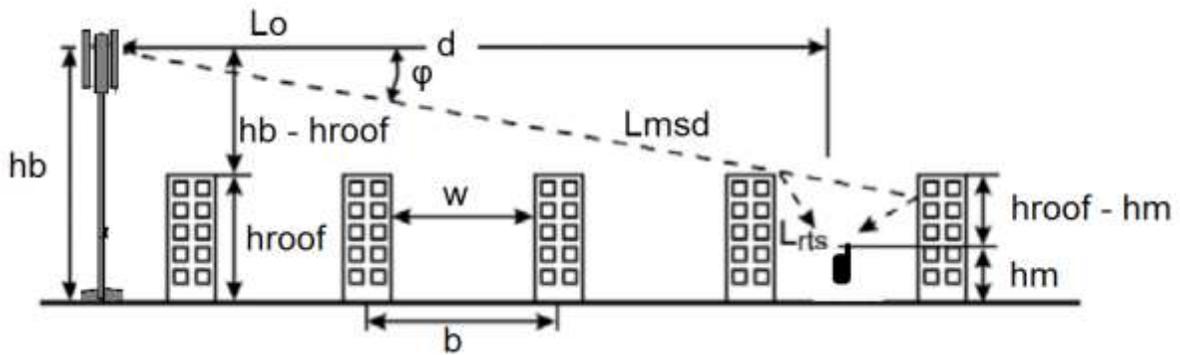
Fuente: (SPIRENT, 2014)

La figura B.4 muestra la arquitectura IMS (SPIRENT, 2014). El equipo del usuario se conecta con el CSCF (*Call Session Control Function*), el cual se encarga de la gestión de las sesiones multimedia. Este se divide en tres dispositivos: P-CSCF (*Proxy CSCF*) que se encarga de las solicitudes de acceso del equipo a la red; I-CSCF (*Interrogating CSCF*) que realiza consultas en el HSS y el S-CSCF; y S-CSCF (*Serving CSCF*) es un servidor que gestiona las sesiones del equipo del usuario dentro de la red IMS y controla los servicios disponibles para él. El HSS autentica y verifica el perfil del usuario. El SLF (*Subscriber Location Function*) sirve para que en caso de tener muchos servidores HSS, elige en cuál de todos se encuentra el usuario que desea acceder a la red. El BGCF (*Breakout Gateway Control Functions*) elige una salida hacia el dominio de circuitos conmutados. El MGCF (*Media Gateway Control Function*) habilita la comunicación entre usuarios IMS y usuarios del dominio de circuitos conmutados. El MGW (*Media Gateway*) permite la interconexión y conversión de mensajes de señalización entre diferentes redes a nivel transporte.

- 3) Continuidad de llamada de voz única o *Single Radio Voice Call Continuity (SRVCC)*. Si la llamada del usuario de LTE comenzó con la tecnología VoLTE y el usuario se mueve a otras áreas donde no existe cobertura LTE, SRVCC transferirá la llamada a otra tecnología (2G ó 3G). La desventaja de esta opción es que la señalización que se da es complicada, por lo que el usuario percibirá una interrupción durante la llamada (SPIRENT, 2014).

## B.5 Modelo de propagación de LTE

Los modelos de propagación presentados en el anexo A se aplican a cualquier tecnología de redes inalámbricas. Sin embargo se han propuesto modelos empíricos que se aplican específicamente para LTE y que son resultado de experimentos y simulaciones. La tabla B.1 muestra los modelos de propagación más comunes (Jain, 2007) (Kumar, Patil y Ram, 2015) y se utiliza cada uno dependiendo el entorno (rural o urbano) y las frecuencias que se van a manejar. Para el caso de COST 231 Walfish-Ikegami, se muestra la figura B.5 para entender mejor las variables que se tomarán en cuenta:



**Figura B.5** Modelo COST 231 Walfish-Ikegami.

Fuente propia basada en (Jain, 2007)

Modelo	Ecuaciones y variables	Cuándo se aplica
Hata	$P [dB] = 69.55 + 26.16\log(fc) - 13.02\log(ht) - a(hr) + (44.9 - 6.55\log(ht))\log(d)$ fc = frecuencia; ht = altura de la antena transmisora; hr = altura de la antena receptora; a(hr) = factor corrección de la altura de la antena del equipo móvil	Área urbana. Para frecuencias de entre 150 y 1500 MHz
COST 231 Extension to Hata	$P [dB] = 46.3 + 33.9\log(fc) - 13.02\log(ht) - a(hr) + (44.9 - 6.55\log(ht))\log(d) + Cm$ fc = frecuencia en MHz; ht = altura de la antena transmisora; hr = altura de la antena receptora; a(hr) = factor corrección de la altura de la antena del equipo móvil; Cm = 0 dB para áreas suburbanas o rurales y 3 dB para áreas urbanas  Para áreas rurales: $a(hr) = (1.1\log(f) - 0.7hr - (1.58f - 0.8))$ para áreas urbanas: $a(hr) = 3.2(\log(11.75hr))^2 - 4.97$	Macrocelas grandes y pequeñas. Para frecuencias de 1.5 GHz a 2 GHz; con altura de la radio base de 30 m a 300 m; con altura del equipo móvil de 1 m a 10 m y distancia de 1 km a 20 km.
COST 231 Walfish-Ikegami	<b>Línea de vista:</b> $P [dB] = 42.6 + 26\log(d) + 20\log(fc)$ d = distancia en km; fc = frecuencia en MHz <b>Sin línea de vista con Lrts + Lmsd mayor a cero:</b> $P [dB] = PLo + Lrts + Lmsd$ <b>Sin línea de vista con Lrts + Lmsd menor a cero:</b> $P [dB] = PLo$  hb = altura de la radio base; hroof = alturas de edificios; hm = altura de la ubicación del equipo móvil; w = ancho de carreteras; b = separación entre edificios en m; φ = ángulo entre la orientación de la calle y la dirección de la señal; Lo = pérdida en espacio libre; Lmsd = pérdidas por difracción de varias vistas; Lrts = pérdidas por difracción del techo al equipo móvil; Lori = factor de corrección empírico $PLo [dB] = 32.4 + 20\log(d) + 20\log(fc)$ $Lrts = -16.9 - 10\log(w) + 10\log(fc) + 20\log(hroof - hm) + Lori$ Para $0^\circ \leq \varphi \leq 35^\circ$ : $Lori = -10 + 0.354\varphi$ para $35^\circ \leq \varphi \leq 55^\circ$ : $Lori = 2.5 + 0.075(\varphi - 35)$ para $55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ : $Lori = 4.0 - 0.114(\varphi - 55)$ $Lmsd = Lbsh + ka + kd\log(d) + kf\log(fc) - 9\log(b)$ Para $hb > hroof$ : $Lbsh = 18\log(1 + (hb - hroof))$ para $hb \leq hroof$ : $Lbsh = 0$ Para $hb > hroof$ : $ka = 54$ para $hb \leq hroof$ y $d \geq 0.5$ km: $ka = 54 - 0.8(hb - hroof)$ para $hb = hroof$ y $d < 0.5$ km: $ka = 54 - 0.8(hb - hroof)d/0.5$ Para $hb > hroof$ : $kd = 18$ para $hb \leq hroof$ : $kd = 18 - 15(hb - hroof)/hroof$ Para áreas suburbanas con vegetación: $kf = 0.7 ((fc/925) - 1)$ para áreas metropolitanas: $kf = 1.5 ((fc/925) - 1)$	Microcelas y macrocelas pequeñas. Áreas urbanas. Frecuencias desde 800 a 2000 MHz. Distancias desde 0.02 a 5 km. Altura de la radio base de 4 a 50 m. Altura de equipo móvil de 1 a 3 m.

**Tabla B.1** Tabla de modelos de propagación de LTE.

Fuente: (Jain, 2007; Kumar, Patil y Ram, 2015)

Otro modelo de propagación de LTE importante es el que se especifica en el documento TS 36.521-1 de la 3GPP, donde se menciona en el anexo B (*Condiciones de propagación*) que para modelar las condiciones de cualquier entorno es necesario tomar en cuenta las copias de la señal principal que llegan a tiempos distintos en el receptor así como el efecto *Doppler*. Principalmente menciona tres escenarios en el enlace de bajada que se deben probar para el estudio y diseño de un sistema de LTE:

- 1) Sin interferencias, por lo que no hay ruido aditivo blanco gaussiano (AWGN), no hay efectos de reflexión o difracción ni multitrayectorias.
- 2) Escenario donde el equipo móvil está en un punto fijo: se estudia el entorno basado en un comportamiento de ruido aditivo blanco gaussiano (AWGN). No hay efectos de reflexión o difracción ni multitrayectorias. Dependiendo la cantidad de antenas que tendrá el transmisor, se aplicarán las siguientes matrices definidas en el dominio de la frecuencia que representan el comportamiento del canal (3GPP,36.521.1):

Número de puertos	Matriz H en el dominio de la frecuencia
1	$\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$
2	$\begin{pmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{pmatrix}$
4	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & j & j \\ 1 & 1 & -j & -j \end{bmatrix}$
8	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & j & j & j & j \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -j & -j & -j & -j \end{bmatrix}$

**Tabla B.2** Clasificación de matrices H dependiendo el número de puertos en transmisor.

Fuente: (3GPP, 36.521.1)

- 3) Escenario con equipo del usuario en movimiento, el cual se forma de tres partes:
  - i. Comportamiento de líneas de retardo caracterizadas por su dispersamiento (rms). Aquí se tienen tres tipos de modelos (Sesia et al., 2011):

Categoría	Modelo del canal	Acrónimo	rms $\tau_{max}$ (ns)
Baja $\tau_{max}$	<i>Extended Pedestrian A</i>	EPA	43
Media $\tau_{max}$	<i>Extended Vehicular A</i>	EVA	357
Alta $\tau_{max}$	<i>Extended Typical Urban</i>	ETU	991

**Tabla B.3** Modelos de canal de LTE.

Fuente: (Sesia et al., 2011)

Cada modelo tiene un comportamiento con perfil de potencia y retardos máximos de cada copia derivada de la señal principal mostrados en la tabla B.4 (Sesia et al., 2011):

Número de copia derivada de la señal principal	Modelo EPA		Modelo EVA		Modelo ETU	
	Máximo retardo (ns)	Potencia relativa (dB)	Máximo retardo (ns)	Potencia relativa (dB)	Máximo retardo (ns)	Potencia relativa (dB)
1	0	0.0	0	0.0	0	-1.0
2	30	-1.0	30	-1.5	50	-1.0
3	70	-2.0	150	-1.4	120	-1.0
4	80	-3.0	310	-3.6	200	0.0
5	110	-8.0	370	-0.6	230	0.0
6	190	-17.2	710	-9.1	500	0.0
7	410	-20.8	1090	-7.0	1600	-3.0
8			1730	-12.0	2300	-5.0
9			2510	-16.9	5000	-7.0

**Tabla B.4** Perfiles de los modelos de canal de LTE.

Fuente: (Sesia et al., 2011)

- ii. Combinación del comportamiento de líneas de retardo y efecto *Doppler*. De estas combinaciones se obtienen 7 modelos enlistados en la figura B.5 (3GPP,36.521.1):

Modelo	Máxima frecuencia Doppler
EPA 5 Hz	5 Hz
EVA 5 Hz	5 Hz
EVA 70 Hz	70 Hz
EVA 200 Hz	200 Hz
ETU 30 Hz	30 Hz
ETU 70 Hz	70 Hz
ETU 300 Hz	300 Hz

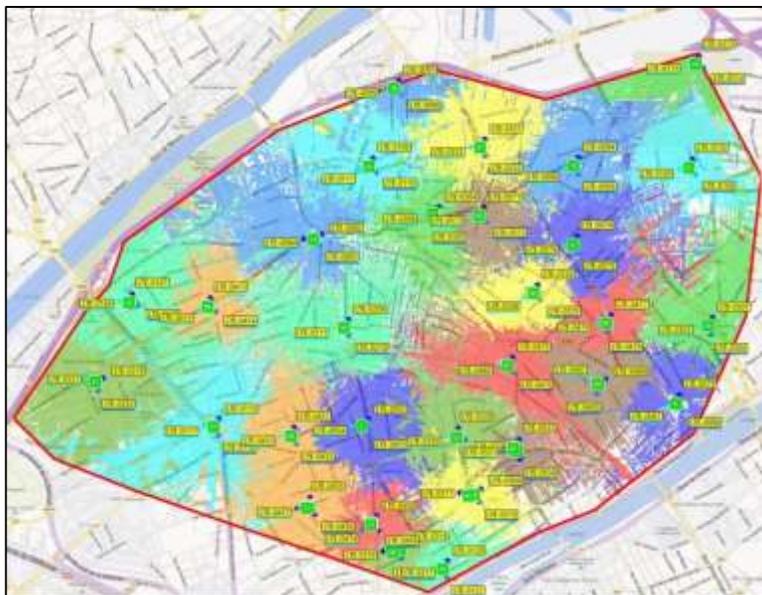
**Tabla B.5** Modelos de canal y frecuencia Doppler de LTE.

Fuente: (3GPP, 36.521.1)

- iii. Matrices de correlación entre el equipo del usuario y el eNodeB en caso de sistemas con más de una antena. Para mejor detalle, se recomienda consultar el documento TS 36.521-1, anexo B de la 3GPP.

Existe una gran cantidad de software especializado que ayuda a realizar los cálculos especificados de cada modelo de propagación de LTE. De ellos se obtienen las predicciones sobre las coberturas que tendrá cada radio base durante el diseño de una red. Algunos programas que se pueden mencionar son:

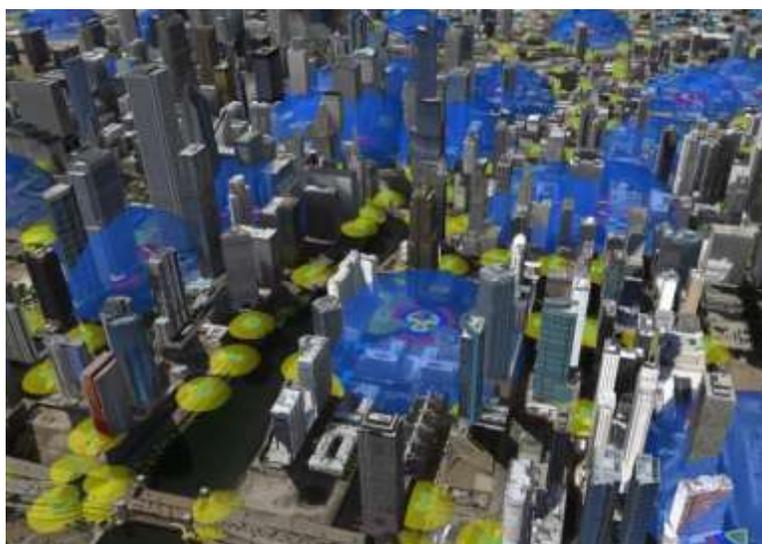
- *ICS Designer*: Software que no solo ayuda para el diseño de una red, sino que además ofrece apoyo en la optimización de su funcionamiento y análisis de ella para detectar problemas de cobertura y planear sus posibles soluciones. Soporta diferentes tecnologías como: GSM, GPRS, EDGE, WCDMA, HSPA, LTE, WiFi, DAB, TV, FM, microondas, todas en un mismo proyecto. Para mayor información, visitar la página de internet: [www.atdi.com](http://www.atdi.com)



**Figura B.6** Programa ICS Designer.

Fuente: [www.atdi.com](http://www.atdi.com)

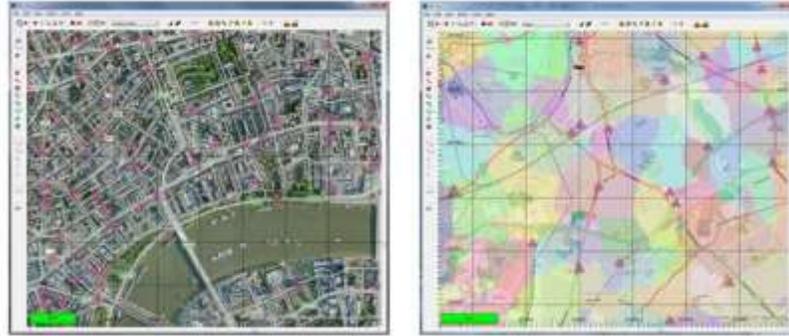
- **Atoll Ran Planning:** Software de apoyo para la planeación y optimización de una red inalámbrica. Incluye tecnologías de la 3GPP (GSM, UMTS, LTE), internet de las cosas, celdas pequeñas, entre otros. Para más información, consultar la página de internet: [www.forsk.com](http://www.forsk.com)



**Figura B.7** Programa Atoll Ran Planning.

Fuente: [www.forsk.com](http://www.forsk.com)

- *Asset Radio Planning*: Software para el apoyo del diseño de una red inalámbrica. Soporta diferentes tecnologías en un solo proyecto como GSM, UMTS, LTE, WiFi y celdas pequeñas. Entre sus características está que puede tomar en cuenta información que la radio base guarda en sus registros. Para mayor información, visitar la página de internet: [www.teoco.com](http://www.teoco.com)



**Figura B.8** Programa Asset Radio Planning.

Fuente: [www.teoco.com](http://www.teoco.com)

- Simulaciones Monte Carlo. Se genera información del número de usuarios que se estiman dentro de la cobertura, su ubicación así como los servicios que más usarán (Peralta Colleges, 2011). Se conforma por una serie de algoritmos que se aplican de manera repetida y aleatoria.

## B.6 Plano de control y del usuario

Una característica importante de LTE es el modo de organizar el proceso de comunicación, el cual se divide en dos planos:

- Plano del usuario: contiene las reglas necesarias para llevar a cabo la transferencia de información del usuario.
- Plano de control: hace referencia a las reglas encargadas de gestionar la operación de cada interfaz.

Por ejemplo, de la figura B.1, el *eNodeB* se comunica con la red troncal EPC a través de la interfaz S1-U para plano de usuario, y de la interfaz S1-MME para plano de control. Existen interfaces que operan en ambos planos pero dependiendo de si es plano de usuario o plano de control, se aplican protocolos diferentes. En la tabla B.6 (Holma y Toskala, 2009) se especifican los planos para cada interfaz de LTE mostrados en la figura B.1:

Interfaz	Plano de usuario	Plano de control
LTE Uu	X	X
X2	X	X
S1-MME		X
S1-U	X	
S5/S8	X	X
S11		X
S10		X
S6a		X
Gx		X

**Tabla B.6** Tabla de tipos de plano para cada interfaz de una red LTE.

Fuente: (Holma y Toskala, 2009)

## B.7 Modelo OSI y protocolos de LTE

Para entender el funcionamiento de una red de datos como es la red de LTE, es necesario usar un modelo en capas donde, dependiendo el funcionamiento de cada capa, se utilizan protocolos específicos. Un protocolo es un conjunto de reglas estandarizadas que establecen la estructura de los datos que se van a transmitir en un mensaje. Para las tecnologías de comunicación inalámbrica, se utiliza el modelo de referencia OSI (modelo de interconexión de sistema abierto) compuesto de 7 capas.

El modelo explica de la siguiente manera cómo se transmite un mensaje a través de la red: la información comienza en el nodo de transmisión (equipo del usuario) desde la capa 7 o de aplicación. Esta información no puede ser enviada en su formato original a través de los medios de transmisión, por lo que las capas siguientes se encargan de realizarle ciertos procesos para adaptarla al medio y conforme desciende, cada capa le agrega un encabezado. Al llegar a la capa 1 o física la información está lista para transmitirse y viajar a través del medio de transmisión. Al llegar al equipo de usuario destino, sucede el proceso inverso: comienza por la capa física, se quitan los encabezados conforme la información asciende hasta terminar en la capa de aplicación en donde el usuario podrá entenderla. Las 7 capas del modelo OSI son:

- **Capa 7 o capa de aplicación:** proporciona las aplicaciones o programas que un usuario puede utilizar para comunicarse dentro de una red.
- **Capa 6 o capa de presentación:** en el transmisor codifica, comprime y cifra datos de la capa de aplicación mientras que en el receptor decodifica, descomprime y descifra los datos que entrega la capa de transporte.

- **Capa 5 o capa de sesión:** crea y mantiene sesiones de diálogo entre las aplicaciones de origen y de destino.
- **Capa 4 o capa de transporte:** es responsable de la transferencia de datos punto a punto mediante la segmentación (en el transmisor) y re-ensamble (en el receptor) de la información; está encargada del control de flujo de datos; permite comunicaciones múltiples en la red al mismo tiempo; asegura que el receptor reciba de manera correcta los datos (confiables y en orden) con técnicas de manejo de errores. En esta capa se tienen mensajes de acuse de recibo, recuperación de errores y secuenciamiento. Los protocolos que soportan dicha capa son: protocolo de control de transmisión (TCP), protocolo de datagramas de usuario (UDP) y protocolo de control de comunicación (SCTP).
- **Capa 3 o capa de red:** especifica el direccionamiento (cada dispositivo que conforma la red tiene una dirección única); selecciona la mejor ruta que tomará la información para viajar en la red (enrutamiento) con ayuda de los *routers*; en el transmisor se encapsula la información de la capa de transporte y en el receptor se des-encapsula la información proveniente de la capa de enlace de datos. En LTE, los protocolos que conforman esta capa son únicamente de plano de control mostrados en la tabla B.7 (Holma y Toskala, 2009).

Protocolo	Establece la comunicación entre:	
NAS	Equipo del usuario	MME
RRC	Equipo del usuario	EnodeB
S1AP	EnodeB	MME
X2AP	EnodeB	EnodeB
GTP-C	MME	MME, SGW
	S-GW	P-GW

**Tabla B.7** Protocolos de la capa de red en LTE.

- **Capa 2 o capa de enlace de datos:** prepara los paquetes de la capa de red para su transmisión a las capas inferiores mediante tramas; controla el acceso a los medios físicos y aplica técnicas de detección de errores. Esta capa se divide en dos: control de enlace lógico (LLC), que agrega información en la trama para identificar el protocolo que en la capa 3 se está utilizando; y capa de acceso al medio (MAC), la cual proporciona el direccionamiento y límites de datos. En LTE, los protocolos que conforman esta capa se encuentran listados en la tabla B.8.

Protocolo	Funciones	
	Plano de usuario	Plano de control
<b>PDCP</b>	Comprime y descomprime el encabezado IP agregado a los datos en capa 3.	Protege los mensajes del protocolo RRC de capa 3.
<b>RLC</b>	Transfiere datos y mensajes RRC asegurando que la transmisión sea confiable con el uso del protocolo ARQ: si no se reciben mensajes de acuse del destino, se retransmite la información.	
<b>MAC</b>	Completa el envío de datos y mensajes RRC clasificándolos en prioridades. También verifica y corrige la información aplicando el protocolo HARQ, que a diferencia del protocolo ARQ, evita las retransmisiones mediante el envío de información adicional.	
<b>GTP – U</b>	Trasfiere información del usuario por medio de túneles establecidos entre el equipo del usuario y un P-GW.	No aplica.

**Tabla B.8** Protocolos de la capa de enlace de datos en LTE.

- **Capa 1 o capa física:** controla la manera en que se transmiten los datos en el medio físico de comunicación. Codifica los dígitos binarios en señales eléctricas, ópticas y de microondas así como genera la señalización requerida.

En la figura B.9 y B.10 se observa que el tipo de protocolos que se aplican a ciertas capas dependen del plano en el que trabajan (Netmanias, 2013b):

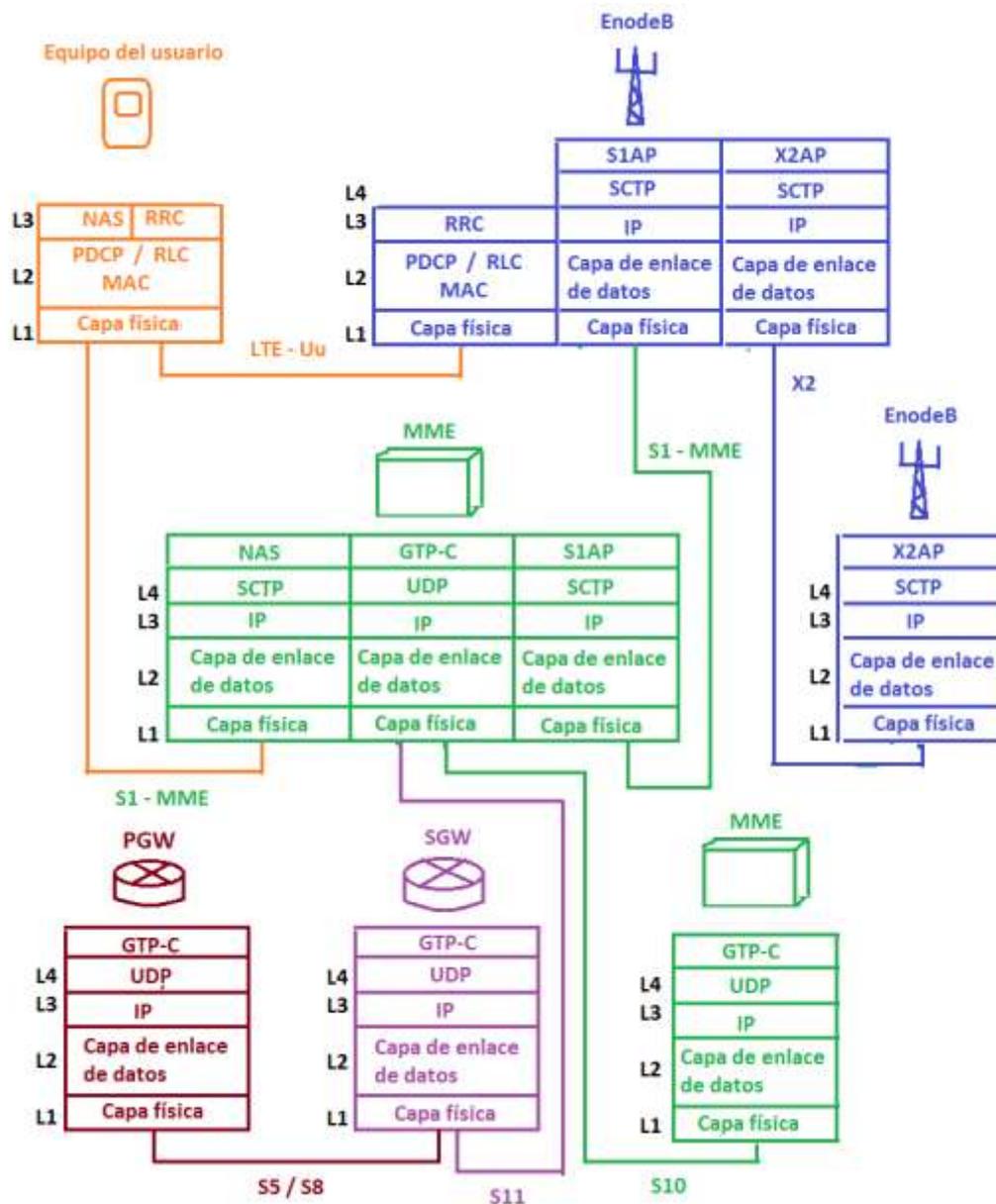
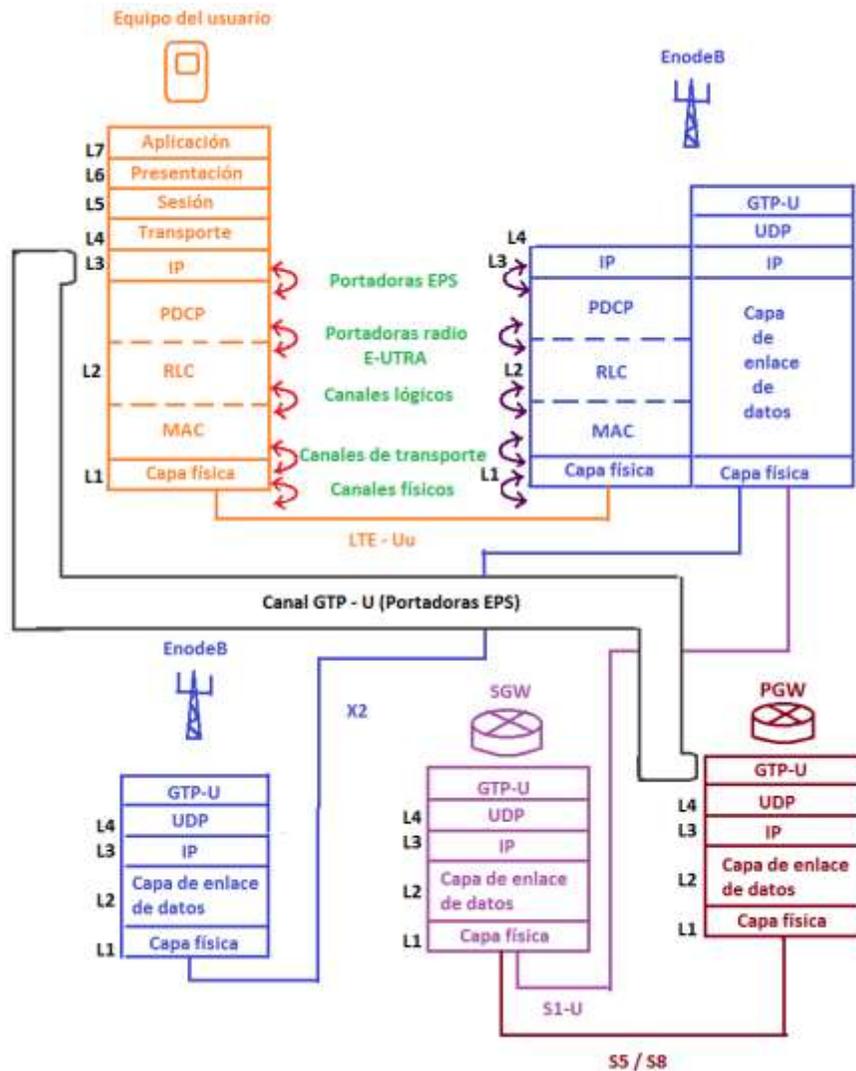


Figura B.9 Modelo en capas de plano de control de cada dispositivo de una red LTE<sup>3</sup>.

En la figura B.9 se muestran para plano de control las capas de cada dispositivo de la arquitectura de LTE así como los protocolos. La manera en que se interconectan es: el equipo del usuario (de 3 capas) se conecta con el *enodeB* y MME; el *enodeB* (de 4 capas excepto si se comunica con el equipo del usuario) se conecta al MME y a otros *enodeB* para los casos de *handover*; el MME (de 4 capas) se encuentra conectado a otros MMEs y al S-GW; por último el S-GW (de 4 capas) se conecta al P-GW (de 4 capas) que llevará la información a redes externas. El protocolo GTP-C se clasifica en la capa 3 pero en la

<sup>3</sup> En la figura, L1 es Layer 1, es decir capa 1; L2 es Layer 2, es decir capa 2; L3 es Layer 3, es decir capa 3 y L4 es Layer 4, es decir capa 4.

ilustración se coloca arriba de la capa 4 porque es un protocolo de túnel, y la función de este tipo de protocolos es transportar información en una capa a la que no pertenece: en LTE es utilizado para la señalización de verificación de calidad de servicio.

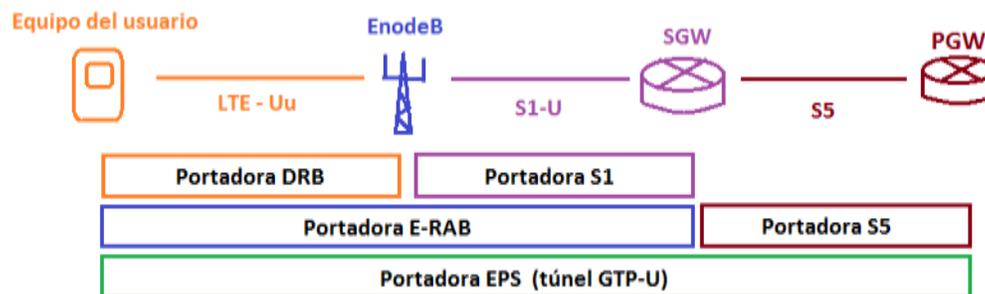


**Figura B.10** Modelo en capas de plano de usuario de cada dispositivo de una red LTE.

En la figura B.10 se muestran las capas y los protocolos para plano de usuario: las 7 capas del equipo del usuario y las 4 capas que conforman al *enodeB*, al S-GW y al P-GW. El MME no tiene funciones para plano de usuario, por eso no se muestra en la ilustración. De nuevo se tiene el protocolo GTP-U por arriba de la capa 4. Para el plano de usuario este protocolo tiene la función de establecer un túnel de comunicación directo entre el equipo del usuario y el P-GW, de modo que el *enodeB* y el S-GW son los encargados de asignar etiquetas a la información para que continúe su trayecto por el túnel establecido.

Es importante agregar que para que un usuario forme parte de una red de LTE, debe pedir permisos de acceso al MME, el cual verifica en el HSS el perfil del usuario (dependiendo del plan al que está suscrito) y le asigna un P-GW. Este proceso se realiza en el plano de control, y una vez que se establece el túnel entre el equipo del usuario y el P-GW, la transferencia de información del usuario se lleva a cabo en el plano del usuario. En este túnel se entregan todos los paquetes IP conocidos como portadoras EPS (*EPS bearers* en inglés). Dichas portadoras van desde el equipo del usuario hasta el P-GW para transferir paquetes IP y lograr servicios de comunicación. Se encuentran formadas por las siguientes subportadoras mostradas en la figura B.11 (Netmanias, 2013a):

- Portadora de datos de radio (DRB), establecida en la interfaz LTE-Uu con identificador asignado por la radio base.
- Portadora S1 (*S1 bearer*), establecida en la interfaz S1-U entre la radio base y el S-GW. Cuando la portadora DRB se encuentra concatenada con la portadora S1 forma la portadora E-RAB (o portadora E-UTRA).
- Portadora S5 (*S5 bearer*), establecida en la interfaz S5 entre el S-GW y el P-GW. Cuando S5 se concatena con la portadora E-RAB forma un EPS (Netmanias, 2013c).



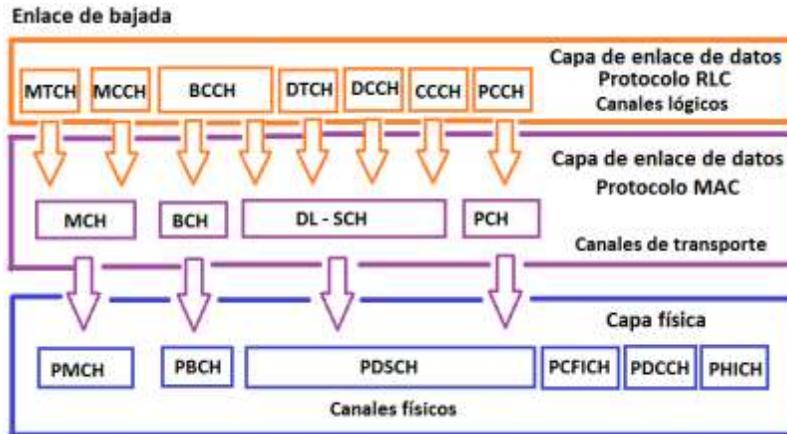
**Figura B.11** Establecimiento de un túnel para comenzar el proceso de comunicación.

## B.8 Canales lógicos, de transporte y físicos

En la figura B.12 se observan los canales lógicos, de transporte y físicos presentes en la interfaz LTE-Uu que conecta el equipo del usuario a una radio base (Sesia et al., 2011). Los paquetes IP que viajan a través del túnel GTP-U o información de señalización para el caso del plano de control, no pueden enviarse directamente al medio de transmisión. Para adaptarlos se procesan con cada protocolo de cada capa correspondiente. La portadora EPS se encapsula en paquetes IP para pasar a la capa de

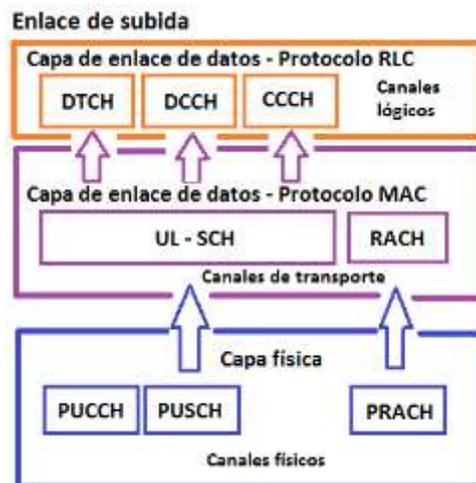
enlace de datos; cuando los paquetes pasan a esta capa son procesados con el protocolo PDCP para pasarlos al protocolo RLC como portadoras E-RAB.

En la figura B.12 se tiene el enlace de bajada donde se observan los procesos que continúan cuando las portadoras E-RAB llegan al protocolo RLC (Sesia et al., 2011). Esta subcapa de la capa 2 las procesa y envía al protocolo MAC por medio de canales lógicos; del protocolo MAC a la capa física la información pasa por medio de canales de transporte, y por último la capa física las envía a través de canales físicos al medio de transporte.



**Figura B.12** Canales utilizados en el enlace de bajada.

En el caso de enlace de subida, se tiene el proceso inverso pero con diferentes canales mostrados en la figura B.13:



**Figura B.13** Canales utilizados en el enlace de subida.

Para el caso de los canales lógicos, se tienen canales para plano de control y plano de usuario mostrados en la tabla B.9 (Sesia et al., 2011):

**Canales lógicos: transmiten el tipo de información que están transportando.**

Canales lógicos de control

- BCCH (*Broadcast Control Channel*). Canal de bajada que provee información del sitio.
- PCCH (*Paging Control Channel*). Canal de bajada que transmite mensajes de *paging*.
- CCCH (*Common Control Channel*). Canal bidireccional utilizado para proveer al equipo del usuario una conexión RRC de la red en caso de no haber disponibles.
- MCCH (*Multicast Control Channel*). Canal de bajada punto a multipunto utilizado para la señalización en los servicios MBMS (servicios de televisión).
- DCCH (*Dedicated Control Channel*). Canal bidireccional punto a punto que transmite información de control cuando el equipo del usuario cuenta con una conexión RRC.

Canales lógicos de tráfico

- DTCH (*Dedicated Traffic Channel*). Canal punto a punto dedicado a un equipo de usuario para la transferencia de información.
- MTCH (*Multicast Traffic Channel*). Canal de bajada punto a multipunto en el que se transmiten datos de un servicio MBMS (servicios de televisión).

**Tabla B.9** Canales lógicos en plano de control y plano de usuario.

En el caso de los canales de transporte y físicos, se dividen en canales de subida y de bajada, mostrados en las tablas B.10 y B.11.

**Canales de transporte: definen de qué manera se lleva a cabo la comunicación.**

Canal de transporte de bajada

- BCH (*Broadcast Channel*). Transmite la información del sitio.
- DL-SCH (*Downlink Shared Channel*). Encargado de variar la modulación, codificación y potencia. Permite el ahorro de potencia en el equipo del usuario y puede incluir servicios MBMS.
- PCH (*Paging Channel*). Continúa la transmisión de mensajes *paging*.
- MCH (*Multicast Channel*). Este canal es utilizado para servicios MBMS.

Canal de transporte de subida

- UL-SCH (*Uplink Shared Channel*). Utiliza técnica HARQ y adaptación del enlace al variar la potencia transmitida, modulación y codificación.
- RACH (*Random Access Channel*). Este canal permite sincronizar el acceso aleatorio asíncrono y síncrono del equipo del usuario a un sitio.

**Tabla B.10** Canales de transporte para subida y bajada.

**Canales físicos: son los recursos físicos utilizados para la transmisión de información al medio de transmisión.**

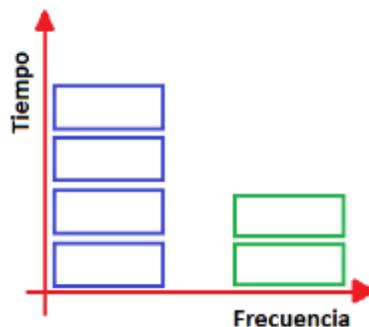
- PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*). Transmite el canal de transporte DL-SCH.
- PUSCH (*Physical Uplink Shared Channel*). Transmite el canal de transporte UL-SCH.
- PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*). Contiene señalización de control de bajada.
- PCFICH (*Physical Control Format Indicator Channel*). Indica el número de símbolos OFDMA reservados para información de control de bajada.
- PUCCHI (*Physical Uplink Control Channel*). Contiene señalización de control de subida.
- PHICH (*Physical Hybrid ARQ Indicator Channel*). Indica en la dirección de bajada si un paquete de subida fue correctamente recibido o no.
- PBCH (*Physical Broadcast Channel*). Transmite información del sistema.
- PMCH (*Physical Multicast Channel*). Transmite el canal de transporte de bajada *multicast*.
- PRACH (*Physical Random Access Channel*). Transmisión de subida de acceso aleatorio dado por el canal de transporte RACH.

**Tabla B.11** Canales físicos para subida y bajada.

## B.9 Ancho de banda y frecuencias de operación

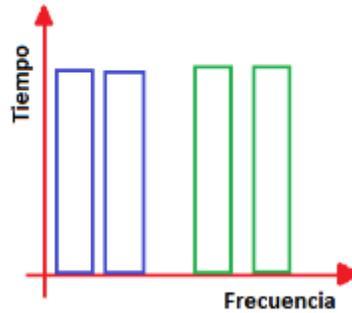
LTE utiliza el modo dúplex para transmitir tanto la información de subida como de bajada. Existen dos maneras de llevarlo a cabo:

- **Modo TDD:** Modo que consiste en tomar una frecuencia y dividirla en pequeños bloques con cierta duración (*time slot*), observar figura B.14. Cada bloque es utilizado para información de bajada o de subida según se requiera en ese momento.



**Figura B.14** Modo TDD.

- **Modo FDD:** En él se asigna una frecuencia específica para la transmisión y otra frecuencia diferente para las señales de recepción, observar figura B.15. Para que se lleve a cabo de manera efectiva la comunicación, es necesario que los rangos de frecuencia utilizados para las señales de bajada estén lo suficientemente separados de las frecuencias de subida. Además será necesario contar con filtros que aseguren el paso de las señales deseadas.



**Figura B.15** Modo FDD.

Para ambos modos, LTE maneja los siguientes tipos de ancho de banda: 1.25 [MHz], 1.6 [MHz], 2.5 [MHz], 5 [MHz], 10 [MHz], 15 [MHz] y 20 [MHz]. En modo FDD, LTE opera en las bandas de frecuencias establecidas en la tabla B.12 (3GPP, 36.101) (LG, 2016):

Banda de frecuencias para LTE de FDD					Ancho de banda del canal [MHz]					
Banda de LTE	Nombre	Subida [MHz]	Bajada [MHz]	Ancho de banda [MHz]	1.25	2.5	5	10	15	20
1	2100	1920 - 1980	2110 - 2170	60			*	*	*	*
2	1900 PCS	1850 - 1910	1930 - 1990	60	*	*	*	*	*	*
3	1800 + GSM	1710 - 1785	1805 - 1880	75	*	*	*	*	*	*
4	AWS 1 (EUA y otros)	1710 - 1755	2110 - 2155	45	*	*	*	*	*	*
5	850 (Japón #1)	824 - 849	869 - 894	25	*	*	*	*		
6	Sólo UMTS	830 - 840	875 - 885	10			*	*		
7	2600	2500 - 2570	2620 - 2690	70			*	*	*	*
8	900 GSM	880 - 915	925 - 960	35	*	*	*	*		
9	1700 (Japón)	1749.9 - 1784.9	1844.9 - 1879.9	35			*	*	*	*
10	AWS 1+3 (3G Americas)	1710 - 1770	2110 - 2170	60			*	*	*	*
11	1500 Inferior (Japón #1)	1427.9 - 1452.9	1475.9 - 1500.9	20			*	*		
12	700 ac (EUA)	698 - 716	728 - 746	18	*	*	*	*		
13	700 c (EUA)	777 - 787	746 - 756	10			*	*		
14	700 PS (EUA)	788 - 798	758 - 768	10			*	*		
15	Reservado	1900 - 1920	2600 - 2620	20						
16	Reservado	2010 - 2025	2585 - 2600	15						
17	700 bc (EUA)	704 - 716	734 - 746	12			*	*		
18	850 Inferior (Japón #2)	815 - 830	860 - 875	15			*	*	*	
19	850 Superior (Japón #3)	830 - 845	875 - 890	15			*	*	*	
20	800 Dividendo digital	832 - 862	791 - 821	30			*	*	*	*
21	1500 Superior (Japón #2)	1447.9 - 1462.9	1495.5 - 1510.9	15			*	*	*	
22	3500	3410 - 3500	3510 - 3600	90			*	*	*	*
23	2000 Banda S	2000 - 2020	2180 - 2200	20	*	*	*	*	*	*
24	1600 Banda L	1625.5 - 1660.5	1525 - 1559	34			*	*		
25	1900 +	1850 - 1915	1930 - 1995	65	*	*	*	*	*	*
26	850 +	814 - 849	859 - 894	30	*	*	*	*	*	
27	800 SMR	807 - 824	852 - 869	17	*	*	*	*		
28	700 APT	703 - 748	758 - 803	45		*	*	*	*	*
29	700 de	N/A	717 - 728	11						
30	2300 WCS	2305 - 2315	2350 - 2360	10			*	*		
31	450	452.5 - 457.5	462.5 - 467.5	5	*	*	*			
32	1500 Banda L	N/A	1452 - 1496	44						

**Tabla B.12** Bandas de frecuencias en modo FDD de LTE.

Fuente: (3GPP, 36.101; LG, 2016)

Para modo TDD, se tienen las bandas de frecuencias establecidas en la tabla B.13 (3GPP, 36.101) (LG, 2016):

Banda de frecuencias para LTE de TDD				Ancho de banda del canal en [MHz]					
Banda de LTE	Nombre	Frecuencia [MHz]	Ancho de banda [MHz]	1.25	2.5	5	10	15	20
33	TD 1900	1900 - 1920	20			*	*	*	*
34	TD 2000	2010 - 2025	15			*	*	*	
35	TD PCS Inferior	1850 - 1910	60	*	*	*	*	*	*
36	TD PCS Superior	1930 - 1990	60	*	*	*	*	*	*
37	TD PCS Centro	1910 - 1930	20			*	*	*	*
38	TD 2600	2570 - 2620	50			*	*	*	*
39	TD 1900 + (China)	1880 - 1920	40			*	*	*	*
40	TD 2300	2300 - 2400	100			*	*	*	*
41	TD 2500	2496 - 2690	194			*	*	*	*
42	TD 3500	3400 - 3600	200			*	*	*	*
43	TD 3700	3600 - 3800	200			*	*	*	*
44	TD 700	703 - 803	100		*	*	*	*	*

**Tabla B.13** Bandas de operación de LTE en el modo TDD.

Fuente: (3GPP, 36.101; LG, 2016)

Otra manera de expresar la frecuencia en la que opera un sitio de LTE es mediante el EARFCN, que es un número entero que representa el rango de frecuencias a las que opera dicho sitio. Este parámetro ayuda a recordar de una manera rápida y práctica el rango de frecuencias. El EARFCN puede tomar valores desde 0 hasta 65 535.

La relación que existe entre el EARFCN y la frecuencia de bajada se da mediante la siguiente ecuación:

(49)

$$FDL \text{ [MHz]} = FDL\_low \text{ [MHz]} + 0.1(NDL - NOffs-DL)$$

FDL [MHz] = Frecuencia que se encuentra operando de bajada.

FDL\_low [MHz] = Frecuencia que se considera más baja en el rango de frecuencias al que pertenece la frecuencia de bajada. Este valor se puede tomar de la tabla B.14.

N DL = EARFCN para los datos de bajada.

NOffs-DL = Mínimo valor considerado en el rango al que pertenece el EARFCN de bajada. Este valor se puede tomar de tabla B.12.

La relación que existe entre el EARFCN y la frecuencia de subida se da mediante la siguiente ecuación:

$$\text{FUL [MHz]} = \text{FUL\_low [MHz]} + 0.1(\text{NUL} - \text{NOffs-UL}) \quad (50)$$

FUL [MHz] = Frecuencia que se encuentra operando para subida.

FUL\_low [MHz] = Frecuencia que se considera más baja en el rango de frecuencias al que pertenece la frecuencia de subida. Este valor se puede tomar de la siguiente tabla B.14.

NUL = EARFCN para los datos de subida.

NOffs-UL = Mínimo valor considerado en el rango al que pertenece el EARFCN de subida.

Este valor se puede tomar de la siguiente tabla B.14 (3GPP, 36.101).

Banda de operación E-UTRAN	Bajada			Subida		
	FDL_low [MHz]	NOffs-DL	Rango de NDL	FUL_low [MHz]	NOffs-UL	Rango de NUL
1	2110	0	0 – 599	1920	18000	18000 – 18599
2	1930	600	600 – 1199	1850	18600	18600 – 19199
3	1805	1200	1200 – 1949	1710	19200	19200 – 19949
4	2110	1950	1950 – 2399	1710	19950	19950 – 20399
5	869	2400	2400 – 2649	824	20400	20400 – 20649
6	875	2650	2650 – 2749	830	20650	20650 – 20749
7	2620	2750	2750 – 3449	2500	20750	20750 – 21449
8	925	3450	3450 – 3799	880	21450	21450 – 21799
9	1844.9	3800	3800 – 4149	1749.9	21800	21800 – 22149
10	2110	4150	4150 – 4749	1710	22150	22150 – 22749
11	1475.9	4750	4750 – 4949	1427.9	22750	22750 – 22949
12	729	5010	5010 - 5179	699	23010	23010 - 23179

**Tabla B.14** EARFCN de bandas LTE.

Fuente: (3GPP, 36.101)

Banda de operación E-UTRAN	Bajada				Subida			
13	746	5180	5180	– 5279	777	23180	23180	– 23279
14	758	5280	5280	– 5379	788	23280	23280	– 23379
...								
17	734	5730	5730	– 5849	704	23730	23730	– 23849
18	860	5850	5850	– 5999	815	23850	23850	– 23999
19	875	6000	6000	– 6149	830	24000	24000	– 24149
20	791	6150	6150	– 6449	832	24150	24150	– 24449
21	1495.9	6450	6450	– 6599	1447.9	24450	24450	– 24599
22	3510	6600	6600	– 7399	3410	24600	24600	– 25399
23	2180	7500	7500	– 7699	2000	25500	25500	– 25699
24	1525	7700	7700	– 8039	1626.5	25700	25700	– 26039
25	1930	8040	8040	– 8689	1850	26040	26040	– 26689
26	859	8690	8690	– 9039	814	26690	26690	– 27039
27	852	9040	9040	– 9209	807	27040	27040	– 27209
28	758	9210	9210	– 9659	703	27210	27210	– 27659
29	717	9660	9660	– 9769	N/A			
30	2350	9770	9770	– 9869	2305	27660	27660	– 27759
31	462.5	9870	9870	– 9919	452.5	27760	27760	– 27809
32	1452	9920	9920	– 10359	N/A			
33	1900	36000	36000	– 36199	1900	36000	36000	– 36199
34	2010	36200	36200	– 36349	2010	36200	36200	– 36349
35	1850	36350	36350	– 36949	1850	36350	36350	– 36949
36	1930	36950	36950	– 37549	1930	36950	36950	– 37549
37	1910	37550	37550	– 37749	1910	37550	37550	– 37749
38	2570	37750	37750	– 38249	2570	37750	37750	– 38249
39	1880	38250	38250	– 38649	1880	38250	38250	– 38649
40	2300	38650	38650	– 39649	2300	38650	38650	– 39649
41	2496	39650	39650	– 41589	2496	39650	39650	– 41589
42	3400	41590	41590	– 43589	3400	41590	41590	– 43589
43	3600	43590	43590	– 45589	3600	43590	43590	– 45589
44	703	45590	45590	– 46589	703	45590	45590	– 46589

**Tabla B.15** EARFCN de bandas LTE (continuación).

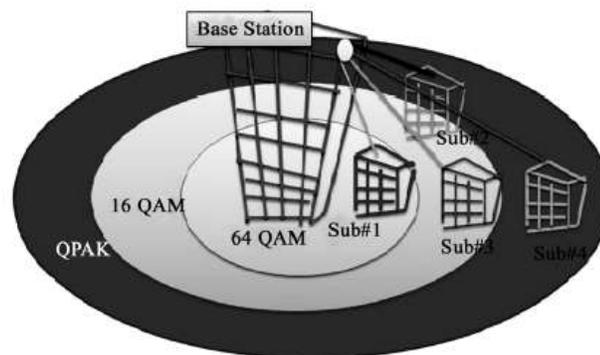
Fuente: (3GPP, 36.101)

## B.10 Técnica de acceso y modulación

Para la tecnología LTE existen dos tipos de técnicas de acceso: OFDMA y SC-FDMA. OFDMA es originario de la modulación OFDM, la cual superpone canales (es decir, no hay espacios de guarda entre ellos) de tal manera que las frecuencias elegidas sean ortogonales entre sí. OFDMA, por su parte, es una técnica de acceso en la cual cada sub portadora es compartida por diferentes usuarios. Esta técnica de acceso es utilizada para los datos que viajan de bajada. Para el enlace de subida se utiliza SC-FDMA que es la versión pre-codificada de OFDMA al agregar la transformada discreta de Fourier (DFT). Esta técnica permite reducir el PAPR (pico de relación de potencia media) y por eso es utilizada para modo ascendente, permitiendo que la batería del equipo del usuario sea más duradera.

El tipo de modulación utilizado depende del ambiente donde se lleva a cabo la comunicación. Éste es determinado en los datos de bajada por medio del indicador de calidad del canal (CQI) y por las señales de referencia medidas en la dirección de subida. Así el sitio puede estimar la calidad de la comunicación y decidir el tipo de modulación. De acuerdo con las condiciones del ambiente, se pueden clasificar tres casos, los cuales son ilustrados en la figura B.16 (Alam, Srivastva, Prakash, Tripathi y Shankhwar, 2013):

- En ambientes donde se dan las peores condiciones de comunicación (distancias grandes a partir de la ubicación del sitio), se utiliza la modulación QPSK (2 bits por símbolo). Aquí se tienen bajas tasas de transmisión de datos y uso de más bits para paridad.
- En ambientes con las mejores condiciones de comunicación (con una SINR alta), el tipo de modulación es 64 QAM (6 bits por símbolo). En esta área se tienen altos niveles de tasa de transmisión de datos y menos bits dedicados para paridad.
- Finalmente, en áreas encontradas entre las peores y las mejores condiciones de comunicación, se utiliza la modulación 16 QAM (4 bits por símbolo).



**Figura B.16** Utilización de modulación adaptativa por LTE.

Fuente: (Alam, Srivastva, Prakash, Tripathi y Shankhwar, 2013)

## B.11 Tecnología MIMO

Esta tecnología es utilizada en el campo de las redes celulares para incrementar la cantidad de información transmitida mediante múltiples antenas en el transmisor y en el receptor. Durante la transmisión de una señal, parte de ella llega al receptor por caminos diferentes y en tiempos diferentes debido a los fenómenos de reflexión de obstáculos como edificios. La tecnología MIMO aprovecha este fenómeno para obtener una interferencia constructiva de la señal y aumentar la eficiencia espectral. Las técnicas que ayudan a MIMO son las siguientes:

- **Diversidad espacial:** donde la transmisión de la información se hace con más de una antena y se recibe con más de una antena. La distancia entre antenas en un nodo depende de la frecuencia de la portadora. De la diversidad espacial se espera un incremento de la relación señal a ruido y por tanto de la calidad del canal.
- **Multiplexación espacial:** Se refiere a la capacidad de aumentar la cantidad de información transmitida mediante el uso de diferentes caminos (reflexiones) que puede tomar la señal. De la multiplexación espacial se espera un incremento de la tasa de transmisión de datos en el canal.

Un radio enlace puede ser clasificado dependiendo la cantidad de antenas que utiliza en el transmisor o en el receptor (Study Paper, 2015):

- **SISO (*Single Input-Single Output*):** donde sólo hay una antena en el transmisor y una antena en el receptor. No hay diversidad espacial. Su ventaja radica en la simplicidad de su implementación.
- **SIMO (*Single Input-Multiple Output*):** en el transmisor se tiene una antena mientras que en el receptor se tienen múltiples antenas. Este sistema no es muy popular debido a la falta de facilidades para implementarlo en un equipo celular (limitado por tamaño, costo y batería).
- **MISO (*Multiple Input-Single Output*):** la diversidad espacial está localizada en el transmisor mientras que el receptor opera con una antena. A comparación de SIMO, tiene la ventaja de que los procesos de diversidad espacial son llevados a cabo en el transmisor y por tanto reduce las limitaciones encontradas en el sistema SIMO.
- **MIMO (*Multiple Input-Multiple Output*):** utiliza múltiples antenas en el transmisor y en el receptor para hacer viajar la misma señal por diferentes caminos y aumentar la tasa de transmisión de datos. La interferencia se vuelve constructiva en el receptor: se incrementa la relación señal a ruido y por tanto la calidad del canal.

## B.12 Tasa de transmisión de datos de bajada y de subida

La tasa de transmisión de datos depende del ancho de banda del canal y del número de antenas utilizadas para la transmisión y recepción de información. LTE aplica la técnica MIMO, la cual hace uso del efecto multitrayectoria para combinar de manera constructiva toda la información que llega desfasada en tiempo y lograr que la señal tenga más potencia en la recepción. La tasa de transmisión de datos en LTE requerida por la 3GPP es la siguiente:

- Capacidad de bajada: 100 [Mbps] ocupando 2 antenas recepción en el equipo del usuario y 2 antenas de transmisión en el sitio, con un ancho de banda de 20 [MHz].
- Capacidad de subida: 50 [Mbps] con una antena de transmisión en el equipo del usuario y 2 antenas de recepción en el sitio con un ancho de banda de 20 [MHz].

Existen diferentes equipos del usuario dependiendo del ancho de banda, la cantidad de antenas utilizadas para la recepción y transmisión así como el tipo de modulación utilizada. La tabla B.16 muestra las 5 categorías de esta clasificación tomando en cuenta un ancho de banda de 20 [MHz] (Holma y Toskala, 2009):

Categoría	1	2	3	4	5
Máxima tasa de transmisión de datos de bajada [Mbps]	10	50	100	150	300
Máxima tasa de transmisión de datos de subida [Mbps]	5	25	50	50	75
Antenas de transmisión	2	2	2	2	4
Antenas de recepción	1	2	2	2	4
Tipo de modulación de bajada	64 QAM				
Tipo de modulación de subida	16 QAM	16 QAM	16 QAM	16 QAM	64 QAM

**Tabla B.16** Clasificación de equipos de usuario LTE en categorías.

Fuente: (Holma y Toskala, 2009)

En el caso de las categorías 2, 3 y 4, lo que permite cambiar la tasa de transmisión de datos de bajada o de subida son el número de bits utilizados para un sólo bloque de transporte en el canal DL-SCH / UL-SCH en un intervalo de tiempo.

### B.13 Codificación

En LTE, el tamaño máximo de un bloque a codificar es de 6144 bits. Se utilizan dos técnicas de codificación: turbo códigos y códigos convolucionales. Los turbo códigos son aplicados a los paquetes de gran tamaño, más específicamente, aquellos que contienen información del usuario. A dichos bloques se les agrega un CRC de 24 bits antes de ser codificados. Para el caso de paquetes que transmiten información de control (más pequeños que los del usuario), se utiliza la codificación convolucional con bits de tasa 1/3 (*rate 1/3 tail biting*).

En el caso de la información del usuario, se toman en cuenta las condiciones del ambiente. Si son favorables o no, se agrega cierta cantidad de bits de paridad dependiendo de las condiciones. Por ejemplo, cuando las condiciones del ambiente son perjudiciales, se buscará proteger la información agregando más bits de paridad. Si por el contrario, las condiciones son favorables, no será necesario agregar demasiados bits de paridad, se mantendrá un BER adecuado y se aumentará la tasa de transmisión de datos del usuario.

### B.14 Interface aérea LTE

Los recursos encargados de contener los datos en LTE se encuentran organizados en el dominio del tiempo con la siguiente estructura (Holma y Toskala, 2009):

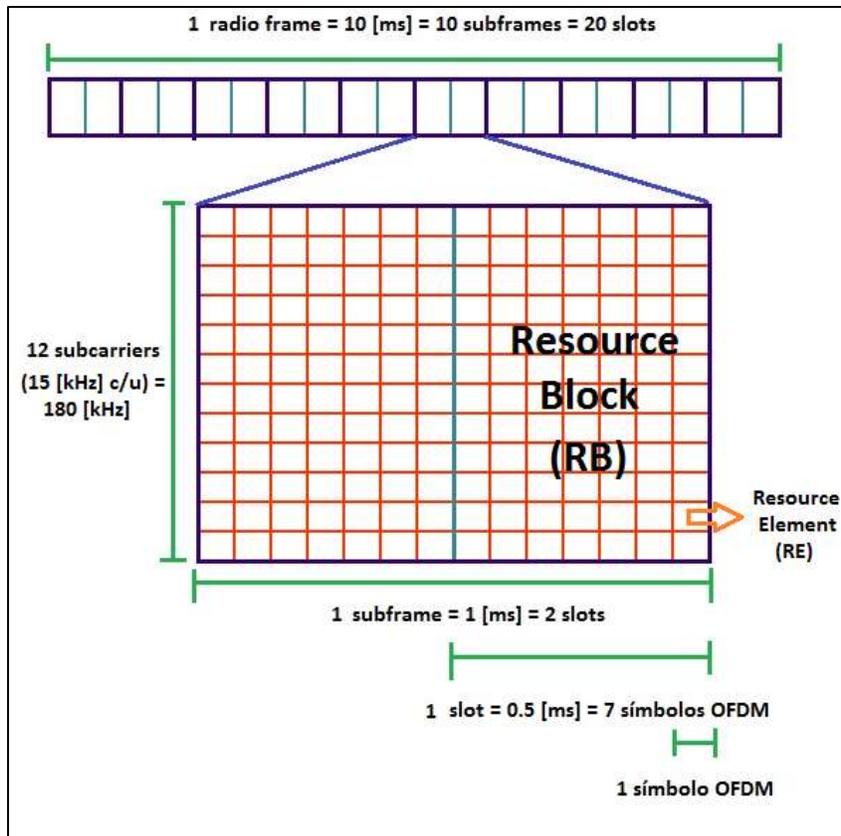
- Un *radio frame* tiene duración de 10 [ms] y está compuesto de 10 *subframes* ó 20 *slots*.
- Un *subframe* dura 1 [ms] y se encuentra conformado de 2 *slots* de 0.5 [ms].
- Cada *slot* contiene 7 símbolos OFDM.

En el dominio de la frecuencia, un canal o *subcarrier* dura 15 [kHz]. A un *subcarrier* que dura un símbolo de OFDM se le conoce como un RE (*Resource Element*), observar figura B.17. A la agrupación de 12 *subcarriers* con duración de un slot se le llama RB (*Resource Block*). En la figura B.17, el tiempo es mostrado en la parte horizontal y la frecuencia en la parte vertical.

Con base a que cada *resource block* ocupa 180 [kHz] y 0.5 [ms], se puede calcular cuántos habrá en cada ancho de banda de LTE (3GPP, 36.101). Esto se muestra en la tabla B.17:

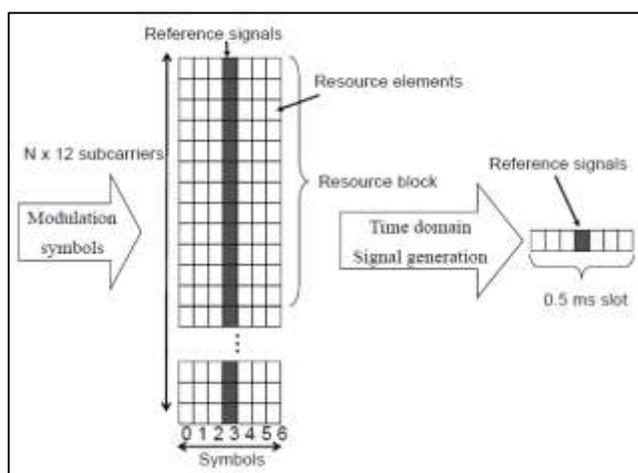
Ancho de banda del canal [MHz]	1.25	2.5	5	10	15	20
Número de <i>resource blocks</i>	6	15	25	50	75	100

**Tabla B.17** *Resource blocks* por cada ancho de banda de LTE.



**Figura B.17** Interface aérea de LTE para un símbolo de OFDMA.

En la figura B.18 se muestra la manera en que se organiza un símbolo utilizado para subida por medio de SC-FDMA (Holma y Toskala, 2009).



**Figura B.18** Interface aérea de LTE para un símbolo de SC-FDMA.

Fuente: (Holma y Toskala, 2009)

## B.15 Señales de referencia

Las señales de referencia son importantes porque definen si las condiciones de ambiente son buenas o malas para que se lleve a cabo la comunicación. Con ellas, el equipo del usuario realiza mediciones y las recolecta en un reporte para observar y decidir si la señal que recibe de un sitio es buena o no. En LTE se tienen dos señales de referencia (Sesia et al., 2011):

- RSRP. El equipo del usuario toma muestras de la potencia recibida para obtener un promedio en watts. Este dato también se envía al sitio para que conozca la potencia promedio que el equipo del usuario recibe.
- RSRQ. Representa la calidad de la señal recibida en el equipo del usuario. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$N * \left( \frac{RSRP}{RSSI} \right) \quad (51)$$

$N$  es el número de *resource blocks* y el RSSI es la potencia total recibida observada por el equipo del usuario proveniente de todas las fuentes, esto incluye no sólo la potencia de la antena servidora, sino de las antenas que se encuentran instaladas en el mismo sitio, de otras celdas, de interferencias y de ruido térmico.

## B.16 Identificador de la celda en LTE (PCI)

Para llevar a cabo funciones de movilidad es necesario que cada celda de la red LTE cuente con un identificador. Este identificador de capa física o PCI (*Physical layer Cell Identity*) es uno de los parámetros esenciales en la configuración de la celda, si no es asignado de manera correcta los usuarios no pueden acceder a la red LTE o sus servicios presentarían varias interrupciones. Se compone de dos señales, las cuales aparte de proveer los PCIs, permiten la sincronización en tiempo y frecuencia (Kavlak e Ilk, 2012):

1. Señal de sincronización primaria (PSS). Es la primera señal que detecta el equipo del usuario cuando busca la mejor celda de LTE. Con ella se detecta la frecuencia de la celda, el canal de sincronización del símbolo en el tiempo (SCH) y el identificador de la celda que puede ser 0, 1 ó 2.
2. Señal de sincronización secundaria (SSS). Se construye en el dominio de la frecuencia y se compone de: el identificador del grupo al que pertenece la celda (con un rango de valores de 0 a 167), detección de la tecnología MIMO, configuración del prefijo cíclico y la sincronización de conjuntos de datos en el tiempo.

El PCI se calcula tomando el identificador de la celda del PSS y tomando el identificador del grupo al que pertenece la celda del SSS. Con ellos se aplica la ecuación:

$$PCI = 3*(Identificador\ del\ grupo\ de\ celda) + Identificador\ de\ la\ celda \quad (52)$$

Existen en total 504 PCIs únicos y para asignarlos a una red de LTE se debe evitar repetirlos. Conforme crezca la red y se coloquen más radio bases, las celdas vecinas que se encuentran muy próximas no deben tener el mismo PCI. Otra estrategia sugiere crear *clústers* (agrupación de celdas) para proveerles una lista de identificadores de grupo que serán asignados a cada radio base LTE, después estos sitios asignarán identificadores de celda a cada sector.

## B.17 Información del sitio

Todos los sitios que ofrecen servicios de comunicación de LTE tienen la función de enviar, en ciertos periodos de tiempo, información de ellos (*System information*) para que los equipos de los usuarios puedan acceder a la red, llevar a cabo procesos de *handover* o mantener información de ubicación de los equipos que están en modo inactivo. Esta información del sitio se divide en dos grupos: MIB (*Master Information Block*) y SIB (*System Information Blocks*):

1. La información MIB contiene valores esenciales de la capa física como el número de antenas del sitio, el ancho de banda y potencia de transmisión. Dicho bloque se transmite cada 40 [ms] (RF Wireless World, 2012) utilizando el canal lógico BCCH y el canal de transporte BCH.
2. La información SIB son grupos de bloques. Utilizan el canal lógico BCCH pero el canal de transporte utilizado es el DL-SCH. Los periodos de transmisión varían: 80, 160, 320, 640, 1280, 2560 ó 5120 [ms] (RF Wireless World, 2012). A continuación se explica específicamente el tipo de información que transmite cada grupo:
  - **SIB 1:** Transmite parámetros de la celda y permite que el equipo del usuario tenga acceso a dicho él.
  - **SIB 2:** Contiene parámetros relacionados con el enlace de subida.
  - **SIB 3:** Transmite información para llevar a cabo la selección de celda que continuará con la comunicación de LTE en los procesos de *handover*.
  - **SIB 4:** Contiene el EARFCN de la celda servidora y de las celdas vecinas que operan en la misma frecuencia de LTE.
  - **SIB 5:** Contiene el EARFCN del sitio y de los sitios vecinos que operan en otras frecuencias de LTE.

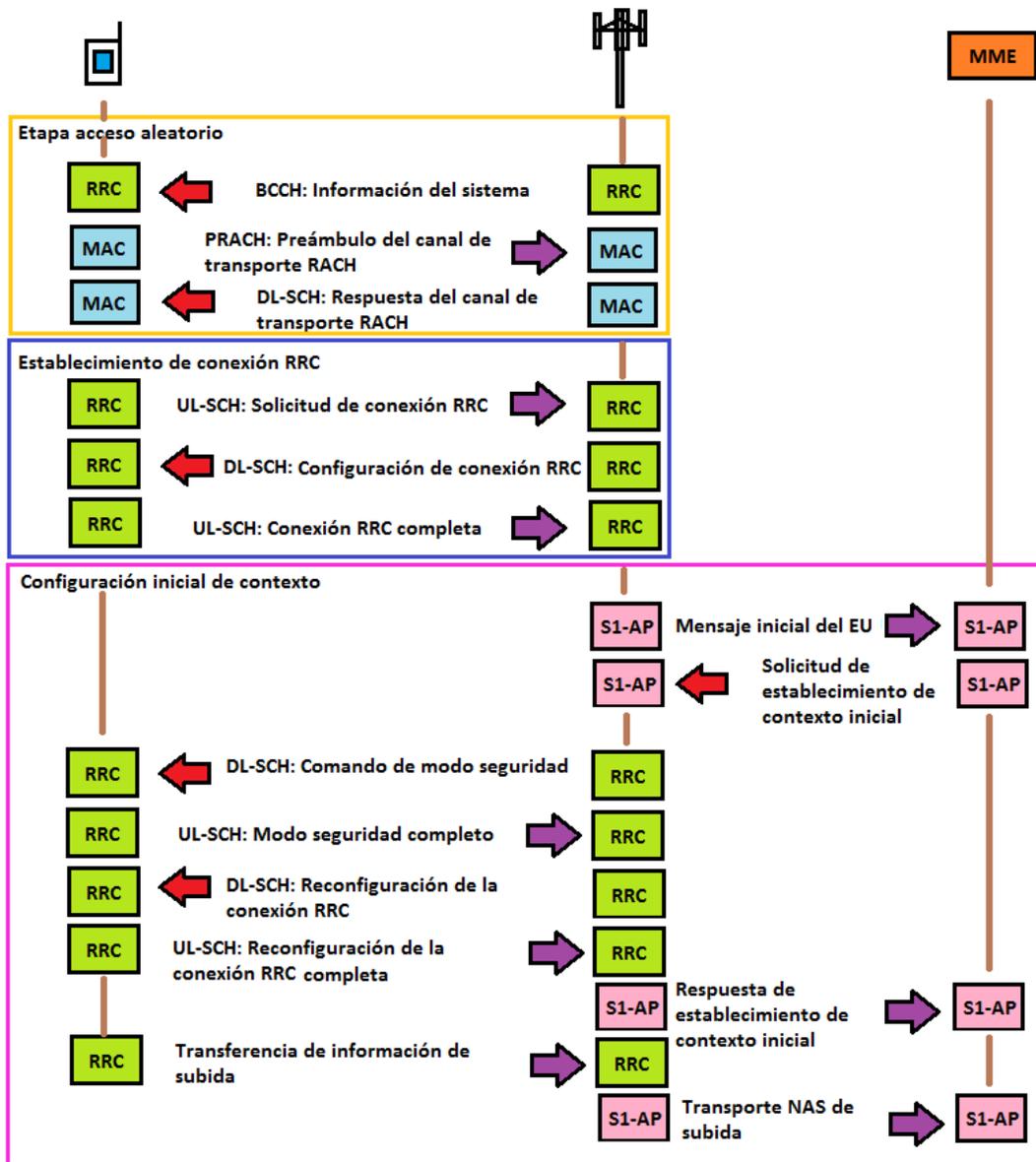
- **SIB 6:** Contiene información de las frecuencias WCDMA que tenga el sitio así como de los sitios vecinos.
- **SIB 7:** Contiene información de las frecuencias GSM que tenga el sitio así como de los sitios vecinos.
- **SIB 8:** Contiene información de las frecuencias CDMA2000 que tenga el sitio así como de los sitios vecinos.
- **SIB 9:** Contiene el identificador HNBID (*Home eNodeB Identifier*) del sitio.
- **SIB 10 y 11:** Contiene notificaciones al usuario sobre desastres naturales, tsunamis y servicios de emergencia.
- **SIB 12:** Contiene otro tipo de mensajes de emergencia utilizados en Estados Unidos (como CMAS - *Commercial Mobile Alert System*).
- **SIB 13:** Contiene la información requerida para llevar a cabo servicios de MBMS (televisión digital).

## B.18 Movilidad

Para llevar una comunicación inalámbrica y de movilidad en LTE, primero se explican los tipos de estado encontrados en un equipo de usuario de LTE, los cuales se dividen en dos categorías (Agrawal, Mor, Keller y Dubey, 2016):

- **Modo inactivo o *idle*:** el equipo del usuario ha sido prendido sin llevar a cabo una sesión de comunicación, ninguna *eNodeB* lo reconoce excepto la red LTE la cual le ha asignado una IP. Su posición es conocida parcialmente utilizando las TAs (*tracking areas*), los cuales son áreas conformadas por un conjunto de celdas. La movilidad es controlada por el equipo del usuario que elige automáticamente las TAs en base a la calidad de conexión, después del cambio de TA notifica a la red sobre su posición. Para mantener su conectividad, monitorea información de *broadcast* y *paging*. En este estado, el equipo del usuario ahorra energía para ser utilizada en el modo conectado.
- **Modo conectado o *connected*:** el equipo del usuario es reconocido por la red LTE y la *eNodeB*. La ubicación del equipo se conoce a nivel celda y la movilidad es controlada por la red LTE. El *eNodeB* decide a qué celda debe moverse el equipo del usuario en base a los reportes de mediciones enviados por éste mismo (mediciones de RSRP, RSRQ y SINR). Cuando se dejan de transmitir datos o llamadas, la conexión RRC es liberada y el equipo del usuario cambia a modo inactivo.

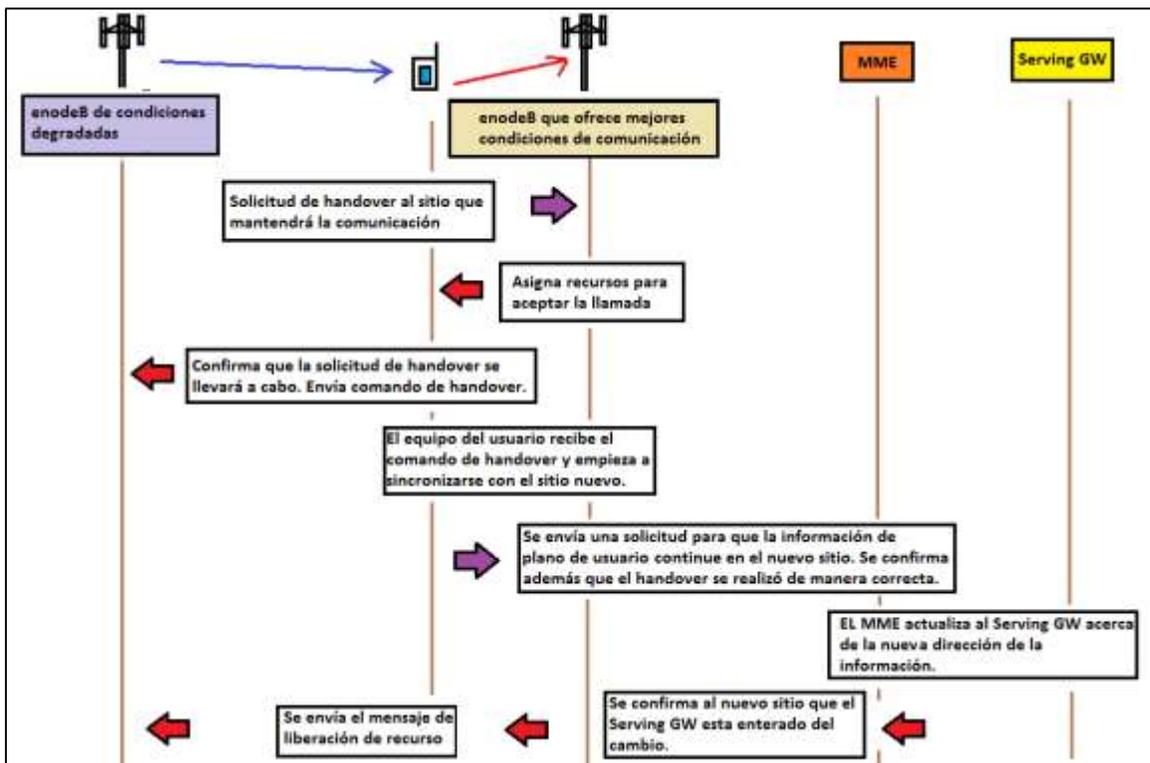
En la figura B.19 (Holma y Toskala, 2009) se observan los mensajes previos entre el equipo del usuario, el sitio y el MME para cambiar del modo inactivo al modo conectado en una red LTE. La primera fase es de acceso aleatorio donde el equipo del usuario intenta formar parte de la celda; una vez que lo logra comienza la fase de conexión RRC y luego establece comunicación con el MME, el cual le proveerá de los recursos y equipos que necesita para llegar a su destino y comenzar la transferencia de información.



**Figura B.19** Establecimiento de una sesión de comunicación de un equipo LTE.

Para llevar a cabo el proceso de movilidad o *handover* en LTE, la red y el *eNodeB* nuevo reservan recursos que continuarán con la sesión de comunicación, después se le ordena al equipo del usuario (encontrado en modo conectado o *RRC\_CONNECTED*) ejecutar el cambio de sitio. Al final, la red transfiere los paquetes perdidos durante el proceso de *handover*. Este procedimiento se conoce como *hard handover* porque el equipo del usuario solo puede estar conectado a una celda a la vez, por lo que existe una interrupción en la comunicación durante el cambio de *eNodeB*. En LTE se manejan principalmente tres escenarios en los que se puede dar un proceso de *handover* (Agusti et al., 2010):

- Movilidad dentro de la red LTE. Este *handover* es conocido como *intra-LTE* y se puede realizar de dos maneras: mediante la interfaz X2 la cual conecta directamente dos *eNodeBs*, por lo que la transferencia de información se puede dar entre los sitios LTE sin pasar por ningún MME; o mediante la interfaz S1, aplicada cuando no se dispone de la interfaz X2 y se involucra el MME, también se aplica cuando se reubican nodos de la EPC y se cambia de *enodeB*, de MME y S-GW.
- Movilidad a otras tecnologías que pertenecen también a la 3GPP (UTRAN para 3G y GERAN para 2G). Este *handover* es conocido como *inter-RAT*.
- Movilidad a otras tecnologías que no pertenecen a la 3GPP (CDMA2000 y WLAN).



**Figura B.20** Procedimiento de un handover intra-LTE tipo X2.

Existen tres fases en el proceso de *handover*: preparación (solicitud de *handover* al nuevo *eNodeB* y preparación de recursos), ejecución (cambio de sitio LTE) y liberación (se liberan los recursos utilizados en la *eNodeB* vieja). La figura B.20 (Holma y Toskala, 2009) ilustra un *intra-LTE* entre dos sitios mediante una interfaz X2. Como el proceso de *handover* se hace directamente entre los *eNodeBs*, la fase de preparación es rápida. Después de la fase de ejecución, se le notifica al MME sobre el cambio de sitio para finalizar con la fase de liberación.

Los reportes que envía un equipo del usuario al *eNodeB* contienen las mediciones realizadas sobre la radio base LTE servidora, de los sitios LTE vecinos y de otros sitios que detecta el equipo del usuario que pueden ser de otras frecuencias o de otras tecnologías. Estas mediciones definen 7 eventos con los cuales se sabe si las condiciones del ambiente son favorables para la comunicación: 5 eventos son para *intra-LTE* y 2 eventos para *inter-RAT* explicados a continuación (Sesia et al., 2011):

**Evento A1:** La celda servidora supera los niveles considerados como de buenas condiciones. En LTE, después de un *handover*, el evento A1 indica que el equipo del usuario ha regresado a niveles aceptables para mantener la sesión de comunicación.

**Evento A2:** La señal de la celda servidora comienza a degradarse. Este evento es un indicador de cobertura pobre. Después de este evento se procede con el evento A5 o B2.

**Evento A3:** El equipo del usuario encuentra una celda vecina que ofrece mejores condiciones de comunicación que la celda servidora.

**Evento A4:** El equipo del usuario detecta una la celda vecina que supera los niveles de buenas condiciones.

**Evento A5:** La señal de la celda servidora está por debajo de los niveles de buenas condiciones mientras que la celda vecina supera estos valores.

**Evento B1:** La señal de la celda vecina que pertenece a otra tecnología supera los niveles de buenas condiciones.

**Evento B2:** Las señal de la celda servidora está por debajo de los niveles de buenas condiciones mientras que la celda vecina de otra tecnología supera estos niveles.

**Tabla B.18** Fases de movilidad de LTE.

Cuando el equipo del usuario detecta que la señal de la celda servidora empieza a degradarse, se presenta el evento A2. Se monitorean los sitios vecinos para elegir una celda candidata (eventos A3, A5 y B2) y se comienza el proceso de *intra-LTE handover* o *inter-RAT*. Al terminar, el evento A1 confirma si la señal de la nueva celda conserva los niveles de buenas condiciones.

## Referencias

- (3GPP,25.215) 3rd Generation Partnership Project, *Physical Layer Measurements (FDD) (Release 9)*. TR 25.215, 2009.
- (3GPP,25.912) 3rd Generation Partnership Project, *Feasibility study for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)*. TR 25.912, 2014.
- (3GPP,25.913) 3rd Generation Partnership Project, *Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN)*. TR 25.913, 2010.
- (3GPP,32.450) 3rd Generation Partnership Project, *Telecommunication management; Key Performance Indicators (KPI) for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN): Definitions*. TS 32.450, 2014.
- (3GPP,32.451) 3rd Generation Partnership Project, *Telecommunication management; Key Performance Indicators (KPI) for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Requirements*. TS 32.451, 2014.
- (3GPP,36.101) 3rd Generation Partnership Project, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception*. TS 36.101, 2015.
- (3GPP,36.521.1) 3rd Generation Partnership Project, *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception; Part 1: Conformance testing*. TS 36.521-1, 2015.
- (3GPP,37.901) 3rd Generation Partnership Project, *User Equipment (UE) application layer data throughput performance (Release 11)*. TS 37.901, 2016.
- (Agrawal, Mor, Keller y Dubey, 2016) Agrawal, J., Mor, P., Keller, J., & Dubey, P. (2016). *LTE: User Equipment (UE) States*. Consultado en agosto, 2017, de IARJSET. Sitio web: <http://www.iarjset.com/upload/2016/si/SITES-16/IARJSET-SITES%206.pdf>
- (Agüero, 2017) Agüero, R. (2017). *Redes de Comunicaciones. Tema 4. Dimensionado de sistemas celulares*. Consultado en noviembre, 2017, de Universidad de Cantabria. Sitio web: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/301/course/section/239/tema\\_04.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/301/course/section/239/tema_04.pdf)
- (Agusti et al., 2010) Agusti, R., Álvarez, F., Casadevall, F., Ferrús, R., Pérez, J., & Sallent, O. (2010). *LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles*. España: Fundación Vodafone España.

- (Alam, Srivastva, Prakash, Tripathi y Shankhwar, 2013) Alam, I., Srivastva, V., Prakash, A., Tripathi, R., & Shankhwar, A. (2013). *Performance Evaluation of Adaptive Modulation Based MC-CDMA System*. Consultado en marzo, 2017, de Scientific Research. Sitio web: [http://file.scirp.org/pdf/WET\\_2013013114151512.pdf](http://file.scirp.org/pdf/WET_2013013114151512.pdf)
- (ALTÁN, 2017) ALTÁN Redes. (2017). *Nuestro compromiso con México*. Consultado en noviembre, 2017, de ALTÁN Redes. Sitio web: <http://altanredes.com/>
- (ATDI, 2017) ATDI. (2017). *Comparison of mechanical and electrical downtilt*. Consultado en octubre, 2017, de ATDI. Sitio web: <http://www.atdi.co.uk/comparison-of-mechanical-and-electrical-downtilt/>
- (Blaunstein y Christodoulou, 2007) Blaunstein, N., & Christodoulou, C. (2007). *Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Links. Terrestrial, Atmospheric and Ionospheric*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- (C.A Consumibles, 2015) C.A Consumibles. (2015). *¿Qué son y para qué sirven las antenas sectoriales?* Consultado en octubre, 2017, de C.A Consumibles. Sitio web: <http://www.caconsumibles.com/blog/conectividad-a-internet/que-son-y-para-que-sirven-las-antenas-sectoriales/>
- (Cardoso, 2014) Cardoso, J. (2014). *Performance Enhancement in Recently Deployed LTE Wireless Networks*. Consultado en marzo 2017, de Técnico Lisboa. Sitio web: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395146463072/Dissertacao.pdf>
- (CommScope, 2017) CommScope. (2017). *SBNHH-1D65B*. Consultado en octubre, 2017, de CommScope. Sitio web: <http://www.commscope.com/catalog/wireless/pdf/part/3766%7C16253/SBNHH-1D65B.pdf>
- (Dahlman, Parkvall, Sköld y Beming, 2007) Dahlman, E., Parkvall, S., Sköld, J., y Beming, P. (2007). *3G Evolution: HSPA and LTE for mobile broadband*. UK: Academic Press.
- (Díaz, Urbano y Quintero, 2012) Díaz, P., Urbano, P., & Quintero, V. (2012). *Estrategias de mitigación de interferencia en una red LTE*. Consultado en agosto, 2017, de la Universidad del Cauca Colombia. Sitio web: <http://www.comtel.pe/comtel2012/callforpaper2012/P18T.pdf>
- (Dieng, 2016) Dieng, D. (2016). *Product description for RBS 6201*. Consultado en julio, 2017, de Ericsson. Sitio web: <https://www.slideshare.net/DiaganaDieng/ericsson-rbs6201-lte1800>
- (EventHelix, 2017) EventHelix. (2017). *LTE Tutorials and Call Flows*. Consultado en marzo, 2017, de EventHelix. Sitio web: [https://www.eventhelix.com/lte/#.WNs44W\\_hDIX](https://www.eventhelix.com/lte/#.WNs44W_hDIX)

- (Forsk, 2016) Forsk. (2016). *Atoll 3.3.2 Model Calibration Guide*. Consultado en diciembre, 2017, de Forsk. Sitio web:  
<https://es.scribd.com/document/335742277/Atoll-3-3-2-Model-Calibration-Guide>
- (Garrido, 2017) Garrido, R. (2017). *Estas son las bandas y frecuencias en las que trabajan los operadores de México*. Consultado en octubre, 2017, de Xataka. Sitio web:  
<https://www.xataka.com.mx/telecomunicaciones/estas-son-las-bandas-y-frecuencias-en-las-que-trabajan-los-operadores-de-mexico>
- (GSA, 2017a) GSA. (2017a). *Cumulative LTE Network Launches 2009 to 2017 – GSA*. Consultado en noviembre, 2017, de Global mobile Suppliers Association. Sitio web:  
<https://gsacom.com/paper/cumulative-lte-network-launches-2009-2017-gsa/>
- (GSA, 2017b) GSA. (2017b). *LTE Network Growth Worldwide*. Consultado en octubre, 2017, de Global mobile Suppliers Association. Sitio web:  
[www.gsacom.com](http://www.gsacom.com)
- (Hasan, 2012) Hasan, T. (2012). *Comparative Performance Analysis of MPSK and MQAM-Modulation Parameters on Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) System over Flat and Frequency Selective Rayleigh Fading Channels with Doppler Frequency*. Consultado en agosto, 2017, de International Journal of Scientific & Engineering Research. Sitio web:  
<https://www.ijser.org/paper/Comparative-Performance-Analysis-of-MPSK-and-MQAM-Modulation-Parameters.html>
- (Holma y Toskala, 2009) Holma, H., & Toskala, A. (2009). *LTE for UMTS. OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*. Reino Unido: John Wiley & Sons Ltd.
- (Howard, 2011) Howard, M. (2011). *Using Carrier Ethernet to Backhaul LTE*. Consultado en julio, 2017, de Infonetics Research, Inc. Sitio web:  
<http://www.infonetics.com/whitepapers/2011-infonetics-research-whitepaper-using-carrier-ethernet-to-backhaul-lte.pdf>
- (Huawei Technologies Co., 2013) Huawei Technologies Co. (2013). *LTE RF Optimization Guide V1.0 LTE RNPS*. Consultado en marzo, 2017, de ACADEMIA. Sitio web:  
<http://www.academia.edu/5281639/LTE-RF-Optimization-Guide>
- (Iquall Networks, 2014) Iquall Networks. (2014). *LTE Backhaul*. Consultado en julio, 2017, de Iquall Networks. Sitio web:  
<http://www.iquall.net/doc/ES/whitepapers/LTE%20Backhaul%20Whitepaper.pdf>
- (Irmer et al., 2009) Irmer, R., Mayer, H., Weber, A., Braun, V., Schmidt, M., Ohm, M., Ahr, N., Zoch, A., Jandura, C., Marsch, P., & Fettweis, G. (2009). *Multisite Field Trial for LTE and Advanced Concepts*. Consultado en marzo, 2017, de IEEE Communications Magazine. Sitio web:  
[http://www.easy-c.de/publications/MultiSiteFieldTrial\\_IEEE\\_ComMag.pdf](http://www.easy-c.de/publications/MultiSiteFieldTrial_IEEE_ComMag.pdf)

- (Jain, 2007) Jain, R. (2007). *Channel Models A Tutorial*. Consultado en agosto, 2017, de Washington University in St. Louis. Sitio web: [http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-08/ftp/channel\\_model\\_tutorial.pdf](http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-08/ftp/channel_model_tutorial.pdf)
- (JDSU, 2012) JDSU. (2012). *Drive Testing LTE*. Consultado en marzo, 2017, de JDS Uniphase Corporation. Sitio web: [http://www.viavisolutions.com/sites/default/files/technical-library-files/drivetesting\\_lte\\_wp\\_nsd\\_tm\\_ae\\_0.pdf](http://www.viavisolutions.com/sites/default/files/technical-library-files/drivetesting_lte_wp_nsd_tm_ae_0.pdf)
- (Jeison, 2009) Jeison, A. (2009). *Modelo de propagación empírico para predicción de pérdidas de potencia en señales inalámbricas bajo el estándar IEEE 802.11B/G*. Consultado en abril, 2017, de Unidades Tecnológicas de Santander UTS. Sitio web: <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistagi/article/download/771/1076>
- (Karlsson y Riback, 2008) Karlsson, J., & Riback, M. (2008). *Initial field performance measurements of LTE*. Consultado en marzo, 2017, de Ericsson. Sitio web: [https://www.ericsson.com/ericsson/corpinfo/publications/review/2008\\_03/files/LTE.pdf](https://www.ericsson.com/ericsson/corpinfo/publications/review/2008_03/files/LTE.pdf)
- (Kathrein, 2017) Kathrein. (2017). *742236V01*. Consultado en octubre, 2017, de Kathrein. Sitio web: <http://www.kathreinusa.com/wp-content/uploads/2015/12/742236V01.pdf>
- (Kavlak e Ilk, 2012) Kavlak, H., & Ilk, H. (2012). *PCI Planning Strategies for Long Term Evolution Networks*. Consultado en agosto, 2017, de International Federation for Information Processing. Sitio web: <http://dl.ifip.org/db/conf/networking/networking2012w/KavlakI12.pdf>
- (Kelly, Zimmerman, Butler y Zheng, 2015) Kelly, I., Zimmerman, M., Butler, R., & Zheng, Y. (2015). *Base station antenna selection for LTE networks*. Consultado en octubre, 2017, de CommScope & Sprint. Sitio web: <http://www.antennasonline.com/main/articles/base-station-antenna-selection-for-lte-networks/>
- (Kiyonagi y Minowa, 2012) Kiyonagi, H., & Minowa, M. (2012). *Field Trial for LTE Mobile Network System*. Consultado en marzo, 2017, de FUJITSU. Sitio web: <http://www.fujitsu.com/global/documents/about/resources/publications/fstj/archives/vol48-1/paper13.pdf>
- (Kreher y Gaenger, 2011) Kreher, R., y Gaenger, K. (2011). *LTE Signaling, Troubleshooting and Optimization*. Reino Unido: John Wiley & Sons Ltd.
- (Kumar, Patil y Ram, 2015) Kumar, P., Patil, B., & Ram, S. (2015). *Selection of Radio Propagation Model for Long Term Evolution (LTE) Network*. Consultado en agosto, 2017, de International Journal of Engineering Research and General Science. Sitio web: <http://pnrsolution.org/Datacenter/Vol3/Issue1/48.pdf>
- (Leopedrini, 2015) Leopedrini. (2015). *¿Qué es CSFB y SRVCC en LTE?*. Consultado en agosto, 2017, de Telecomhall. Sitio web: <http://www.telecomhall.com/es/que-es-csfb-y-srvcc-en-lte.aspx>

- (LG, 2016) LG. (2016). *LTE frequency band*. Consultado en marzo, 2017, de LG. Sitio web: [http://niviuk.free.fr/lte\\_band.php](http://niviuk.free.fr/lte_band.php)
- (Mehmood y Aslam, 2009) Mehmood, A., & Aslam, W. (2009). *Channel Estimation for LTE Downlink*. Consultado en octubre, 2017, de Blekinge Institute of Technology. Sitio web: [https://www.academia.edu/389825/CHANNEL\\_ESTIMATION\\_FOR\\_LTE\\_DOWNLINK](https://www.academia.edu/389825/CHANNEL_ESTIMATION_FOR_LTE_DOWNLINK)
- (Millán, 2007) Millán, R. (2007). *GPON (Gigabit Passive Optical Network)*. Consultado en julio, 2017, de Consultoría Estratégica en Tecnologías de la Información y Comunicaciones. Sitio web: <http://www.ramonmillan.com/tutoriales/gpon.php>
- (Netmanias, 2013a) Netmanias. (2013a). *LTE Identification III: EPS Session/Bearer Identifiers*. Consultado en marzo, 2017, de Netmanias. Sitio web: <http://www.netmanias.com/en/?m=view&id=techdocs&no=5907>
- (Netmanias, 2013b) Netmanias. (2013b). *LTE Network Architecture: Basic*. Consultado en marzo, 2017, de Netmanias. Sitio web: <http://www.netmanias.com/en/post/techdocs/5904/lte-network-architecture/lte-network-architecture-basic>
- (Netmanias, 2013c) Netmanias. (2013c). *LTE QoS: SDF and EPS Bearer QoS*. Consultado en marzo, 2017, de Netmanias. Sitio web: <http://www.netmanias.com/en/?m=view&id=techdocs&no=5908>
- (ONO, 2016) ONO. (2016). *Manual Comandos MS-DOS*. Consultado en marzo, 2017, de Ono. Sitio web: [https://www.ono.es/resources/files/ayuda-y-soporte/internet/optimizar/Manual\\_Comandos\\_MS-Dos.pdf](https://www.ono.es/resources/files/ayuda-y-soporte/internet/optimizar/Manual_Comandos_MS-Dos.pdf)
- (Peralta Colleges, 2011) Peralta Colleges. (2011). *Monte Carlo Simulations*. Consultado en agosto, 2017, de Peralta Colleges. Sitio web: <http://web.peralta.edu/trustees/files/2011/08/montecarlo.pdf>
- (Quintero, 2017) Quintero, V. (2017). *Capítulo 5: Sistemas Móviles Celulares*. Consultado en noviembre, 2017, de Grupo de Radio e Inalámbricas. Sitio web: <http://artemisa.unicauca.edu.co/~vflorez/RCMI/RCMI-5%20x6.pdf>
- (Rappaport, 2002) Rappaport, T. (2002). *Wireless Communications: Principles and Practice*: Prentice Hall.
- (Raymaps, 2011) Raymaps. (2011). *Average Cell Throughput Calculations for LTE*. Consultado en marzo, 2017, de Raymaps. Sitio web: <http://www.raymaps.com/index.php/average-cell-throughput-calculations-for-lte/>

- (RF Wireless World, 2012) RF Wireless World. (2012). *LTE system information blocks-MIB,SIB-1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11*. Consultado en marzo, 2017, de RF Wireless World. Sitio web:  
<http://www.rfwireless-world.com/Terminology/LTE-MIB-SIB-system-information-blocks.html>
- (Ross, 2016) Ross, W. (2016) *TTC MOBILE RBS 6000 Series Focus on RBS 6201 and 6601*. Consultado en julio de 2017, de TTC MOBILE. Sitio web:  
<http://slideplayer.com/slide/10203160/>
- (Rysavy, 2016) Rysavy, P. *Challenges and Considerations in Defining Spectrum Efficiency*. Consultado en septiembre de 2016, IEEE. Sitio web:  
<http://ieeexplore.ieee.org/document/6730658/>
- (Sahin, 2012) Sahin, N. (2012). *What is iperf, jperf and xjperf? How can you use them to test network performance?* Consultado en marzo, 2017, de Port135. Sitio web:  
<http://www.port135.com/2012/02/16/what-is-iperf-jperf-and-xjperf-how-can-you-use-them-to-test-network-performance/>
- (Sesia, Toufik y Baker, 2011) Sesia, S., Toufik, I., & Baker, M. (2011). *LTE-the UMTS long term evolution: from theory to practice*. UK: John Wiley & Sons Ltd.
- (SNS Telecom, 2011) SNS Telecom. (2011). *LTE RF Planning*. Consultado en octubre, 2017, de SNS Telecom. Sitio web:  
<https://sites.google.com/site/lteencyclopedia/lte-radio-link-budgeting-and-rf-planning>
- (SPIRENT, 2014) SPIRENT. (2014). *IMS Architecture. The LTE User Equipment Perspective*. Consultado en agosto, 2017, de SPIRENT. Sitio web:  
[https://www.spirent.com/~media/White%20Papers/Mobile/IMS\\_Architecture\\_White\\_Paper.pdf](https://www.spirent.com/~media/White%20Papers/Mobile/IMS_Architecture_White_Paper.pdf)
- (Srinivasa y Gajula, 2011) Srinivasa, V., & Gajula, R. (2011). *Protocol Signaling Procedures in LTE*. Consultado en marzo, 2017, de Radisys. Sitio web:  
<http://go.radisys.com/rs/radisys/images/paper-lte-protocol-signaling.pdf>
- (SSP, 2017) SSP. (2017). *Velocidades reglamentarias en la red vial primaria*. Consultado en noviembre, 2017, de Secretaría de seguridad pública. Sitio web:  
[http://data.ssp.cdmx.gob.mx/reglamentodetransito/limites\\_velocidad.html](http://data.ssp.cdmx.gob.mx/reglamentodetransito/limites_velocidad.html)
- (Tamosoft, 2016) Tamosoft. (2016). *Throughput Test. Help Documentation Version 1.0*. Consultado en marzo, 2017, de Tamosoft. Sitio web:  
<http://www.tamos.com/docs/tt1.pdf>
- (USNA, 2017) USNA. (2017). *Doppler Effect*. Consultado en agosto, 2017, de United States Naval Academy. Sitio web:  
<https://www.usna.edu/Users/physics/ejtuchol/documents/SP411/Chapter19.pdf>

- (Zambrano, 2017) Zambrano, D. (2017). *Best Practices for Ensuring Fiber Optic System Performance*. Consultado en octubre, 2017, de JDSU. Sitio web:  
[https://www.bicsi.org/uploadedfiles/pdfs/conferences/mea\\_11\\_04\\_dubai/04-David%20Zambrano%20-%20JDSU%20-%20Ensuring%20Fiber%20Optic%20System%20Performance.pdf](https://www.bicsi.org/uploadedfiles/pdfs/conferences/mea_11_04_dubai/04-David%20Zambrano%20-%20JDSU%20-%20Ensuring%20Fiber%20Optic%20System%20Performance.pdf)
- (Zhang, 2018) Zhang, X. (2018). *LTE Optimization Engineering Handbook*. China: John Wiley & Sons Singapore.
- (Zik y Hoefler, 2016) Zik, J., & Hoefler, B. (2016). *Maximizing LTE MIMO Throughput Using Drive Test Measurements*. Consultado en marzo, 2017, de PCTEL. Sitio web:  
<http://rfsolutions.pctel.com/artifacts/MIMOThroughputDriveTestWebinar.pdf>

## DECLARACIÓN

---

La información presentada en este trabajo se obtuvo de diversas fuentes que se consideran fidedignas y se consignan puntualmente en las referencias. El uso dado a la información es de naturaleza estrictamente de investigación académica y de divulgación, sin fines de lucro o de otra índole. Se ha hecho también el mayor esfuerzo por acreditar debidamente datos, opiniones y contenidos presentados, por lo que cualquier error u omisión en ello, es del todo involuntario.

*México, D.F., Febrero de 2018*

---

**Daniela Berenice Reyes Badillo**