



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**SISTEMA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

TEMA:

**Propuesta para la ampliación de cobertura LTE en zonas
suburbanas mediante la Implementación de un sistema
radiante en la banda APT700**

AUTOR:

Tapuy Rendón, Sahél Josué

**Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de
Magister en Telecomunicaciones**

TUTOR:

MSc. Manuel Romero Paz

Guayaquil, 19 de Julio del 2019



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**SISTEMA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **Tapuy Rendón, Sahél Josué**, como requerimiento para la obtención del Título de **Magister en Telecomunicaciones**.

TUTOR

f. _____
MSc. Romero Paz, Manuel

DIRECTOR DE MAESTRÍA

f. _____
MSc. Romero Paz, Manuel

Guayaquil, 19 de Julio del 2019



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**SISTEMA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **TAPUY RENDÓN, SAHÉL JOSUÉ**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Propuesta para la ampliación de cobertura LTE en zonas suburbanas mediante la implementación de un sistema radiante en la banda APT700**, previo a la obtención del Título de **Magister en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, 19 de Julio del 2019

EL AUTOR

f. _____
Tapuy Rendón, Sahél Josué



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**SISTEMA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

AUTORIZACIÓN

Yo, **TAPUY RENDÓN, SAHÉL JOSUÉ**

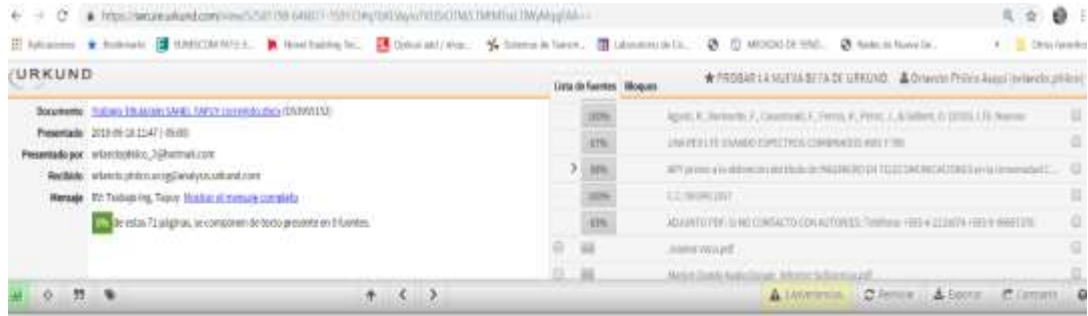
Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Propuesta para la ampliación de cobertura LTE en zonas suburbanas mediante la Implementación de un sistema radiante en la banda APT700**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 19 de Julio del 2019

EL AUTOR:

f. _____
Tapuy Rendón, Sahél Josué

REPORTE URKUND



SISTEMA DE POSTURACIÓN RADIANTE EN TELECOMUNICACIONES

TEMA: Propuesta para la ampliación de cobertura LTE en zonas suburbanas mediante la implementación de un sistema radiante en la banda APT700

AUTOR: Tapuy Rendón, Sahél Josué

Trabajo de Titulación previo a la obtención del grado de Ingeniero en Telecomunicaciones

TUTOR: MSL, Manuel Romero Ruiz

Santiago, 30 de junio de 2023

SISTEMA DE POSTURACIÓN RADIANTE

TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de Titulación, fue realizado en su totalidad por Tapuy Rendón, Sahél Josué, como requisito para la obtención del Título de Ingeniero en Telecomunicaciones.

Reporte Urkund del trabajo de titulación de Maestría en Telecomunicaciones denominado: “Propuesta para la ampliación de cobertura LTE en zonas suburbanas mediante la Implementación de un sistema radiante en la banda APT700” del ingeniero Tapuy Rendón, Sahél Josué. Una vez realizado el análisis antiplagio el resultado indica que no tiene (0%) coincidencias.

DEDICATORIA

A Jesucristo

Por el regalo de la vida, la inteligencia y el conocimiento, siempre
orquestando cada detalle en mí caminar.

A mis Padres

Eduardo Eusebio Tapuy & Luz Ofelia Rendón. Su ejemplo de amor,
esfuerzo y sacrificio es de profunda inspiración y testimonio en mi vida.

A mi segunda familia

Marco González & Esther Soriano. La pasión que tienen por Dios, la
ciencia y amor al prójimo motivan la vida de quienes tienen el privilegio
de conocerlos.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi gratitud a Dios por brindarme sabiduría, conocimiento y fuerzas para culminar con éxito la meta propuesta.

A mi familia por el apoyo incondicional durante la trayectoria de este trabajo. Las adversidades fortalecieron el amor que existe entre nosotros.

Al Ing. José Borbor, por facilitarme las herramientas y brindarme su apoyo para realizar las pruebas de campo con éxito.

A la UCSG y todos los docentes que con sus conocimientos y experiencia, motivaron a culminar este postgrado e investigación.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
SISTEMA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

MSc. Manuel Romero Paz

TUTOR

f. _____

MSc. Manuel Romero Paz

DIRECTOR DEL PROGRAMA

f. _____

MSc. Luis Córdova Rivadeneira

REVISOR

f. _____

MSc. Orlando Philco Asqui

REVISOR

INDICE GENERAL

DEDICATORIA	VI
AGRADECIMIENTO.....	VII
INDICE GENERAL.....	IX
INDICE DE FIGURAS.....	XII
INDICE DE TABLAS.....	XV
RESUMEN	XVI
ABSTRACT	XVII
INTRODUCCIÓN	2
CAPÍTULO 1. Descripción del Proyecto de Intervención.....	4
1.1 Justificación del Problema	4
1.2 Antecedentes	5
1.3 Definición del Problema	6
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 Objetivo General.....	6
1.4.2 Objetivos Específicos.....	6
1.5 Hipótesis	7
1.6 Metodología de la Investigación.....	7
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	8
2.1 Ondas Electromagnéticas y Espectro.....	8
2.2 Propiedades de las Ondas de Radio.....	10
2.2.1 Reflexión.....	10
2.2.2 Dispersión	11
2.2.3 Difracción.....	11
2.2.4 Refracción	11
2.2.5 Absorción.....	11
2.3 Características de Antenas.....	11
2.3.1 Ganancia.....	12
2.3.2 Área Efectiva	13
2.3.3 Patrón de Radiación.....	13
2.3.4 Polarización.....	15
2.3.5 Impedancia y VSWR.....	16
2.4 Configuraciones de Antenas.....	16

2.4.1	El Dipolo.....	16
2.4.2	Antenas de Haz.....	17
2.4.3	Antena de Bocina.....	18
2.4.4	Antenas Reflectoras.....	19
2.5	Modelos de Propagación en Zonas Urbanas y Rurales	20
2.5.1	Pérdidas por Camino.....	21
2.5.2	Ruido	22
2.5.3	Interferencia.....	23
2.5.4	Modelo Young.....	25
2.5.5	Modelo Okumura.....	26
2.5.6	Modelo Hata	27
2.5.7	Modelo COST 231	27
2.5.8	Modelo Lee	28
2.6	Desvanecimiento y Caracterización Multitrayecto.....	30
2.6.1	Desvanecimiento de Larga Escala.....	30
2.6.2	Desvanecimiento a Pequeña Escala.....	33
2.7	Long Term Evolution	36
2.7.1	Aspectos Claves de LTE.....	38
2.7.2	Tecnologías de LTE.....	41
2.7.3	Arquitectura LTE	48
2.7.4	Interfaz de Radio.....	52
2.7.5	Mediciones E-UTRAN	56
2.7.6	Estimación de canal en Down Link	58
2.7.7	Bandas de Frecuencias.....	60
CAPÍTULO 3. ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DEL SISTEMA RADIANTE LTE APT 700.....		63
3.1	Generalidades APT700	63
3.2	Espectro y Armonización de la Frecuencia	64
3.3	Análisis de Rendimiento	66
3.3.1	Menos Pérdida de Propagación	66
3.3.2	Rendimiento de Enlace y Eficiencia Espectral.....	67
3.3.3	Mejor Cobertura Indoor y penetración que otras bandas	69
3.3.4	Radio celular más grande que otras bandas.....	70
3.3.5	Beneficios para el usuario final en el uso de APT700	70
3.3.6	Gran economía de escala para APT700.....	72

3.4	Comparación de cobertura de diferentes bandas de frecuencia.....	72
3.5	Especificación Técnica de Parámetros Físicos y de Radiación	74
CAPITULO 4. MEDICIONES, RESULTADOS Y ANÁLISIS.....		77
4.1	Recolección de Mediciones: XCAL	77
4.1.1	Características XCAL.....	78
4.2	Procesamiento de Mediciones: XCAP	79
4.2.1	Ventajas de XCAP.....	79
4.3	Análisis de Mediciones del Sistema Radiante APT700.....	80
4.4	Desempeño de Cobertura en Bandas AWS / APT700	81
4.4.1	Comportamiento RSRP para LTE AWS	83
4.4.2	Comportamiento de RSRP para LTE APT700.....	84
4.4.3	Análisis Comparativo RSRP	86
4.5	DESEMPEÑO DE CALIDAD.....	90
4.5.1	RSRQ.....	90
4.5.2	SINR.....	91
4.5.3	CQI y Esquema de Modulación	92
4.6	Desempeño de Interfaz Aire	93
4.6.1	Rendimiento de Throughput.....	93
4.6.2	Conexión RRC.....	96
CONCLUSIONES		98
RECOMENDACIONES.....		100
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....		101
REFERENCIAS.....		103

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama tridimensional de un patrón de radiación de antena bidimensional.	14
Figura 2.2: Patrón típico de radiación de antena (con ganancia normalizada) en una dimensión.	15
Figura 2.3: La antena dipolo de media onda y su patrón de radiación.	17
Figura 2.4: Una antena típica Yagi (el estrechamiento en las longitudes del elemento se ha exagerado en esta imagen para mayor claridad).	18
Figura 2.5: Antena reflectora de alimentación offset para TV satelital de transmisión directa.	19
Figura 2.6: Respuesta del filtro del receptor con interferencia co-canal y adyacente.	24
Figura 2.7: Resultados de la medición de Young de pérdida de trayectoria versus la distancia en millas en Manhattan y el Bronx a 150MHz.	26
Figura 2.8: Determinación de la altura efectiva de antena de la estación base para el Modelo Lee en el modo Punto a Punto.	30
Figura 2.9: Niveles de señal recibidos en relación con el nivel de la señal mediana en ambiente con sombra.	31
Figura 2.10: Histograma de las mediciones de pérdida de sombra en comparación con una pdf normal.	32
Figura 2.11: Pérdida total del trayecto versus la distancia desde el transmisor en un entorno con desvanecimiento de sombra.	32
Figura 2.12: Ilustración del efecto de retardo de propagación por trayectos múltiples en los símbolos recibidos.	34
Figura 2.13: Ilustración de cómo la dispersión doppler puede ocurrir.	35
Figura 2.14: Cronología aproximada del panorama de estándares de comunicaciones móviles.	37
Figura 2.15: Perspectiva del dominio de frecuencia de las tecnologías de acceso múltiple de LTE.	42

Figura 2.16: Tres beneficios fundamentales de las antenas múltiples: (a) diversidad de ganancia; (b) arreglo de ganancia; (c) ganancia de multiplexación espacial.....	44
Figura 2.17: Programación rápida y adaptación de enlaces.....	45
Figura 2.18: Arquitectura General de E-UTRAN.....	49
Figura 2.19: Elementos de red del EPC.....	51
Figura 2.20: Ilustración de los mecanismos de transferencia de información en la interfaz radio.....	53
Figura 2.21: Control de los servicios portadores radio y S1 a través de la interfaz S1-MME.....	55
Figura 3.1: Adopción de APT700 versus US700 (estatus 2016).....	63
Figura 3.2: Comparación de la pérdida de propagación entre diferentes bandas. (desde APT700 hasta 2.6 GHz).....	67
Figura 3.3: Comparación de la pérdida de propagación entre diferentes bandas. (Desde APT700 hasta 2.6 GHz).....	68
Figura 3.4: Comparación RSRP dentro de edificaciones entre varias bandas.....	70
Figura 3.5: Ilustración del patrón de radiación para una antena de bajas frecuencias.....	75
Figura 4.1: Esquema de configuración física del sistema XCAL.....	78
Figura 4.2: Ilustración de funcionalidades de XCAP.....	79
Figura 4.3: Plot de recorrido total realizado en la banda AWS.....	80
Figura 4.4: Plot de recorrido total realizado en la banda APT700.....	81
Figura 4.5: Distribución de niveles RSRP para LTE AWS en zonas suburbanas.....	83
Figura 4.6: Gráficas de la PDF y CDF de niveles RSRP para la banda LTE AWS.....	84
Figura 4.7: Distribución de niveles RSRP para LTE APT700 en zonas suburbanas.....	85
Figura 4.8: Gráficas de la PDF y CDF de niveles RSRP para la banda LTE APT700.....	86
Figura 4.9: Niveles RSRP obtenidos durante el recorrido. Superior: LTE AWS; Inferior: LTE APT700.....	87

Figura 4.10: Niveles RSRP (LTE APT700) considerando únicamente muestras mayores a -90 dBm.	88
Figura 4.11: Niveles RSRP (LTE AWS) considerando únicamente muestras mayores a -90 dBm.	89
Figura 4.12: Señales comparativas RSRP.	90
Figura 4.13: Plot de niveles RSRQ para LTE APT700 en zonas suburbanas.	90
Figura 4.14: Plot del SINR en LTE APT700.	91
Figura 4.15: Distribución de niveles de CQI en LTE APT700.	92
Figura 4.16: Esquemas de Modulación en LTE APT700.	93
Figura 4.17: Plot de throughput RLC DL para LTE AWS.	94
Figura 4.18: Plot de throughput RLC DL para LTE APT700.	95
Figura 4.19: Tasas de transmisión de datos en RLC DL para LTE AWS.	95
Figura 4.20: Tasas de transmisión de datos en RLC DL para LTE PT700.	96
Figura 4.21: Ilustración de eventos exitosos de procedimientos RRC en el establecimiento de sesiones de usuario en la banda LTE APT700.	97

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Distribución del Espectro Electromagnético	9
Tabla 2.2: Ecuaciones de pérdidas para modelo Hata en áreas urbanas, suburbanas y abiertas.....	27
Tabla 2.3: Referencia de Pérdida por Trayectoria del Modelo Lee	29
Tabla 2.4: Sumario del rendimiento clave para LTE Release 8.....	41
Tabla 2.5: Categorías LTE de equipos de usuario en Releases 8 y 9.....	47
Tabla 2.6: Niveles de CQI, tasas de código y eficiencia bit/símbolo.	59
Tabla 2.7: Bandas mejor identificadas para el despliegue de LTE.	60
Tabla 3.1: Planes de frecuencia estandarizados de 3 GPP para una segmentación adecuada de la banda de 700 MHz.....	64
Tabla 3.2: Países que han adoptado la segmentación APT700 MHz.....	65
Tabla 3.3: Comparación de cobertura de enlace ascendente de escenarios típicos.....	73
Tabla 3.4: Configuración de parámetros físicos para el sistema LTE APT700.....	74
Tabla 4.1: Categorización de valores de RSRP.	82
Tabla 4.2: Valores Cuantitativos Estadísticos RSRP.	87

RESUMEN

En este trabajo de titulación se realizó un estudio cuyo propósito fue elaborar una propuesta de un sistema radiante LTE que ofrezca un mejor rendimiento de cobertura en áreas suburbanas, que garantice estabilidad en los servicios de packet switching y que coexista con sistemas físicos LTE desplegados. Para tal efecto, se seleccionó la banda de APT700 como frecuencia de operación y se planteó una configuración estándar para los parámetros físicos y de radiación para una celda. Se interactuó con los sistemas LTE (AWS/APT700) mediante tareas establecidas en UE para prestaciones de PS con el objetivo de establecer criterios y comparaciones. Los niveles de RSRP, RSSI, RSRQ, CQI, SINR fueron recolectados mediante instrumentos de ingeniería RF (escáner, UE, GPS, antena). Se utilizó software profesional Accuver: para la lectura de la interfaz aire XCAL, y para el post procesado de datos XCAP. Los resultados evidencian que existe una mejoría notable en la distribución de niveles de RSRP, mayor huella de cobertura que AWS, estabilidad en la conmutación de paquetes y estimaciones de calidad de canal aceptables. Por lo tanto se concluye que el funcionamiento LTE sobre la banda de 700 MHz tiene resultados positivos para el despliegue de cobertura y ventaja en entornos suburbanos, convirtiéndose en la mejor opción para cobertura nacional.

Palabras Claves: LTE, AWS, APT700, huella de cobertura, RSRP, RSRQ

ABSTRACT

In this degree work, a study was carried-out whose purpose was to develop a proposal for an LTE radiant system that offers better coverage performance in suburban areas, which guarantees stability in packet switching services and coexists with deployed LTE physical systems. For this purpose, the APT700 band was selected as the operating frequency and a standard configuration was set for the physical and radiation parameters for a cell. We interacted with LTE systems (AWS / APT700) through tasks established in UE for PS services in order to establish criteria and comparisons. The levels of RSRP, RSSI, RSRQ, CQI, SINR were collected by means of RF engineering instruments (scanner, UE, GPS, antenna). Accuver professional software was used: for reading the XCAL air interface, and for the XCAP data post processing. The results show that there is a notable improvement in the distribution of RSRP levels, greater coverage footprint than AWS, stability in packet switching and acceptable channel quality estimates. Therefore, it is concluded that the LTE operation over the 700 MHz band has positive results for the deployment of coverage and advantage in suburban environments, becoming the best option for national coverage.

Keywords: *LTE, AWS, APT700, coverage footprint, RSRP, RSRQ*

INTRODUCCIÓN

La presente investigación tiene como objeto de estudio la ampliación de cobertura LTE mediante un sistema radiante en la banda APT700, que se puede definir, como la mejora de los niveles de recepción de intensidad de señal en zonas donde la degradación de cobertura y calidad es permanente, principalmente en lugares conformados por asentamientos irregulares o también considerados suburbanos.

La característica principal de este tipo de atenuación de señal es la naturaleza y comportamiento que las ondas electromagnéticas experimentan al viajar por el espacio, efecto que atenúa la distribución de la energía a lo largo de multitrajectos alterando los niveles de recepción por debajo de los esperados.

Para analizar esta problemática es necesario mencionar sus causas principales. Una de ellas es la banda de operación del sistema. Se entiende por banda de operación al conjunto de frecuencias (licenciadas y reguladas) utilizadas para la comunicación en la interfaz aire. La frecuencia en la que se emiten las ondas se relaciona directamente con la propagación de la señal y están asociadas con el alcance y la penetración. Otro factor muy importante es la orografía y residencia de los abonados. En dichas zonas existe un crecimiento evidente de infraviviendas y demanda de prestaciones de servicios móviles, dando lugar a escenarios donde es común encontrar valles, cimientos, colinas, vegetación, estructuras metálicas y huecos de cobertura.

En el ámbito profesional, el interés versó en conocer las características, ventajas y rendimiento que la banda APT700 puede ofrecer al sistema LTE y por ende, permita la coexistencia con sistemas inalámbricos LTE AWS, garantice las prestaciones de servicio de datos y minimice las pérdidas de cobertura.

Durante la investigación de campo, se utilizaron software y herramientas de precisión para la recolección de los niveles de calidad y recepción la de señal. Los resultados se analizaron con elementos de estadística descriptiva, de forma gráfica y comparativa (AWS vs. APT700). El sistema radiante propone una configuración estándar para su implementación, es decir, parámetros establecidos y fijos que garantizan el funcionamiento sobre la banda de los 700 MHz.

Este trabajo se enfoca en plantear una propuesta tecnológica para incrementar la cobertura LTE utilizando la banda APT700. Pretende demostrar que, dicho sistema es capaz de transmitir información simultáneamente en el entorno LTE AWS. El resultado del análisis evidencia el aumento de cobertura LTE y el rendimiento de los parámetros de calidad y throughput superiores a los obtenidos en la banda AWS.

En el capítulo 1 se describen los aspectos que delimitan el proceso de la investigación científica. Desde su importancia y justificación hasta la metodología de la investigación empleada. El capítulo 2 abarca conocimientos fundamentales en cuanto a teoría de las ondas electromagnéticas, antenas, modelos de propagación y sistemas de cuarta generación. El capítulo 3 se centra en el estudio y caracterización de APT700 y se realiza el planteamiento de la configuración del sistema radiante propuesto. Los resultados del análisis y mediciones se describen en el capítulo 4. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

CAPÍTULO 1. Descripción del Proyecto de Intervención

En el presente capítulo se presenta la importancia del tema de investigación, los aspectos que justifican su relevancia actual y se establecerá el problema científico a investigar. De la misma manera, se propondrán los objetivos generales y específicos, la hipótesis y la metodología de la investigación científica aplicada durante el proceso.

1.1 Justificación del Problema

El despliegue de redes celulares (aumento de la cobertura) es un proceso vital para los operadores móviles, por ésta razón, mantienen procesos continuos de planificación. Debido a esto, logran la captación de nuevos abonados, incrementan el número de suscriptores y cumplen objetivos y políticas en función de los servicios que se ofrecen.

Uno de los desafíos presentes a combatir en este proceso son los fenómenos y comportamientos que las ondas electromagnéticas experimentan durante la propagación. Al mismo tiempo, es posible sumarle las características de uniformidad en el terreno y zonas geográficas donde existen elevaciones y degradaciones en la superficie (incluyendo asentamientos irregulares).

La intensidad de la señal LTE (Long Term Evolution) en la banda AWS posee considerables pérdidas por el espacio libre (FSL, Free Space Loss). Seybold (2005) afirma que la degradación se relaciona directamente a su longitud de onda y a la distancia donde se encuentre el receptor. Por esto, se presentan escenarios desfavorables para las numerosas poblaciones que se concentran en dichas zonas.

Es por ello que, la implementación de un sistema radiante sobre la banda APT700 se ofrece como una alternativa tecnológica que asegura el incremento de la señal LTE, mitigando pérdidas en el espacio libre, maximizando el alcance de cobertura en comparación al actual, y a su vez, coexistiendo perfectamente junto al despliegue LTE AWS.

Para los fines de mi argumento, el presente documento expone la propuesta para incrementar la cobertura LTE en zonas suburbanas mediante la implementación de un sistema radiante operando en la banda APT700.

1.2 Antecedentes

El sistema LTE tiene sus principales fundamentos en tres tecnologías: la tecnología multiportadora OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) permitiendo un esquema de acceso múltiple muy flexible; la tecnología de múltiples antenas para la explotación del dominio espacial como otra nueva dimensión y la aplicación orientada a la conmutación de paquetes sobre la interfaz de radio. (Sesia, Toufik, Baker, 2011)

El ETSI (European Telecommunications Standards Institute) deja establecido alrededor de 85 bandas de operación para el sistema de interfaz aire (E-UTRA, Evolved Universal Terrestrial Radio Access) para los canales de downlink/uplink considerando modos de duplexación TDD/FDD independientes. La banda 28 es la asignada para transmitir y recibir la información desde los 703 - 748 MHz hasta los 758 - 803 MHz respectivamente. (ETSI 3GPP, 2018)

Los parámetros de radio principales establecidos para la medición de intensidad de señal LTE, son el RSRP (Reference Signal Received Power) y RSSI (Received Signal Strength Indicator). El RSRP permite el análisis de recepción de potencia de una celda específica. Mientras que, el RSSI proporciona una métrica de potencia sobre la banda ancha total recibida en un dispositivo móvil considerando las fuentes de celdas de servicio, de canal no compartido, interferencias del canal adyacente y el ruido térmico presente en la banda. (Sesia et al., 2011)

Existen estudios acerca del rendimiento y comportamiento de los modelos de predicción en áreas suburbanas y rurales para los 860, 2300 y 3500 MHz. Es posible predecir la pérdida de ruta de la señal

considerando los modelos COST 231, Modelo Hata Extendido y el Modelo SUI. (Wu, Baker, 2012)

La ARCOTEL (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones) en su reporte de Septiembre 2018, presenta estadísticas nacionales sobre las radio bases en operación y comercialización. La información indica que, existen únicamente 5 sistemas LTE radiando sobre la banda APT700, es decir, la mayor concentración y dependencia se centra en los sistemas LTE AWS/1900/1700/850. Esto ha motivado a la investigación e implementación de nuevos sistemas LTE que provean mejores prestaciones en cuanto a cobertura y satisfacción del cliente.

1.3 Definición del Problema

La falta de cobertura LTE en zonas suburbanas ocasiona la degradación de los servicios de datos a los suscriptores. No se dispone en dichas zonas de un sistema radiante que provea mejores prestaciones de cobertura que LTE AWS.

1.4 Objetivos

A continuación, se plantean el objetivo general y los objetivos específicos:

1.4.1 Objetivo General

Elaborar una propuesta para incrementar la cobertura LTE utilizando un Sistema Radiante en la banda APT700.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a. Implementar un sistema de propagación en la banda APT700 que coexista con la cobertura actual LTE AWS.
- b. Verificar el incremento de cobertura LTE en zona donde existen asentamientos suburbanos.

- c. Analizar parámetros de cobertura, calidad y prestación de servicio de datos en la banda AWS versus la banda APT700 como resultado del aumento de cobertura.

1.5 Hipótesis

Si se logra implementar estratégicamente un sistema radiante sobre la banda de operación APT700 se podrá verificar la mejora de cobertura de la señal LTE en zonas donde actualmente existe deficiencia, garantizando un incremento en la recepción de señal y calidad, y ofreciendo rendimiento en la prestación de servicio de datos.

1.6 Metodología de la Investigación

El presente documento en primera instancia hace uso del estudio de alcance Exploratorio-Descriptivo. Se profundizan fundamentos en cuanto al comportamiento de las ondas electromagnéticas en el espacio y caracterización de antenas. Se analiza el espectro radio eléctrico y la gamma de bandas de operación estandarizadas incluyendo un estudio profundo sobre APT700. Además se explora la tecnología y arquitectura de redes LTE.

La investigación aplica el enfoque Cuantitativo con metodología No Experimental, al ejecutar tareas sistemáticas para recolectar muestras de la interfaz aire y contrastar mediciones de niveles de recepción de señal AWS versus APT700. No se modificarán variables físicas ni patrones de radiación, es decir, se analizarán resultados de calidad, throughput y efectos propios de la propuesta implementada sobre el sistema de propagación LTE APT700.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Ondas Electromagnéticas y Espectro

Las ondas electromagnéticas se originan debido a un flujo de corriente alterna eléctrica de alta frecuencia. Dichas ondas son la conformación de campos eléctricos y magnéticos transversales, los cuales transportan energía. El movimiento de los electrones, crea ondas electromagnéticas y éstas se propagan en el espacio.

El científico James C. Maxwell demostró la coexistencia de ellas a través de su publicación *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* de 1865, tratado que posteriormente fue reafirmado por Heinrich Hertz, en 1887. Aquellos estudios preliminares son el cimiento del electromagnetismo.

Actualmente las comunicaciones inalámbricas se fundamentan en la gestión y control de diversas clases de ondas electromagnéticas orientadas a múltiples aplicaciones. Una definición matemática simplificada que relaciona las propiedades de frecuencia y longitud de onda viene dada por la ecuación 2.1, considerando las siguientes características:

$$c = \lambda * f \quad (2.1)$$

Donde

c , es la constante de la velocidad de la luz en el vacío 300.000 Km/s.

λ , es la longitud de onda en metros.

f , es la frecuencia característica de la onda dada en Hertz.

Otra característica presente es la velocidad de propagación con la que se desplazan las ondas en el medio. Depende principalmente del material de incidencia y de la frecuencia de la señal. Así se tiene que, la velocidad será distinta en un cable de fibra óptica, de cobre o en el espacio (donde la velocidad de propagación sufre mayores afectaciones).

Existe un conjunto que abarca diversos tipos de ondas de radio denominado espectro electromagnético. Se llama así a la agrupación de todos los tipos de señales electromagnéticas que se propagan con cierta longitud de onda y de distintas formas, como por ejemplo: ondas de Tierra o superficie, ondas de cielo y por línea de vista. Un ejemplo son las llamadas microondas o frecuencias de longitud de onda muy pequeña. (Seybold, 2005)

La siguiente tabla representa un segmento del espectro electromagnético que resume los intervalos de frecuencia, las bandas de asignación y su forma de propagación.

Tabla 2.1: Distribución del Espectro Electromagnético

Rango de Frecuencia	Banda	Propagación y Uso
3 a 30 KHz	Frecuencia muy baja (VLF, Very Low Frequency)	Onda de Tierra, estas frecuencias se utilizan para la navegación y radio de larga distancia.
30 a 300 KHz	Frecuencia Baja (LF, Low Frequency)	Onda de Tierra, con aplicaciones en radio navegación y radio balizas.
300 a 3000 KHz	Frecuencia Media (MF, Medium Frequency)	Ondas de cielo, se utilizan en radiodifusión AM.
3 a 30 MHz	Frecuencia Alta (HF, High Frequency)	Ondas de cielo, se utilizan para radioaficionados, comunicación con barcos y aviones.
30 a 300 MHz	Frecuencia Muy Alta (VHF, Very High Frequency)	Ondas de cielo y línea de vista, con aplicaciones en TV y radio FM.
300 a 3000 MHz	Frecuencia Ultra Elevada (UHF, Ultra High Frequency)	Línea de vista, estas frecuencias se utilizan para difusión de TV, microondas, teléfonos móviles.
3 a 30 GHz	Frecuencia Súper Elevada (SHF, Super High Frequency)	Línea de vista, se usan para microondas, comunicaciones por satélite.
30 a 300 GHz	Frecuencia Extremadamente Alta (EHF, Extra High Frequency)	Línea de vista, se usan en comunicaciones por satélite y radar.

Fuente: El Autor

La banda VLF al ser de baja frecuencia dicta que se requieren grandes antenas para lograr una eficiencia razonable. Una buena regla general es que la antena debe ser del orden de una décima parte de una longitud de onda (o más) en tamaño para proporcionar un rendimiento eficiente. Dicho rango solo permite el uso de anchos de banda estrechos (la banda completa tiene un ancho de solo 27 KHz).

Las bandas de baja frecuencia y de frecuencia media cubren el rango de 30 kHz a 3 MHz. Ambas bandas utilizan la propagación de la onda terrestre y alguna onda del cielo. Si bien, las longitudes de onda son más pequeñas que la banda VLF, estas bandas aún requieren antenas muy grandes.

Estas frecuencias permiten un ancho de banda ligeramente mayor que la banda VLF. Los usos incluyen radio AM de radiodifusión y la señal de referencia horaria WWVB que se emite a 60 KHz para los relojes automáticos ("atómicos"). (Dennys, 2006)

2.2 Propiedades de las Ondas de Radio

Cuando una onda electromagnética incide sobre una superficie, se presentan una variedad de fenómenos físicos. Tales fenómenos dependen de la polarización de la onda, de la geometría de la superficie, de las propiedades del material en el que incide, y de las características de la superficie relativa a la longitud de la onda electromagnética.

Consideremos ahora las siguientes propiedades que incurren en la degradación y deterioro de la onda electromagnética:

2.2.1 Reflexión

Siempre que una onda electromagnética atraviesa una superficie lisa (o con ciertos bordes afilados), una porción de la onda será reflejada. Esta reflexión se puede considerar como de espejo, donde el ángulo de incidencia y ángulo de reflexión son iguales.

2.2.2 Dispersión

Ocurre cuando la onda incidente enfrenta una superficie irregular o áspera. Cuando una onda se dispersa, las reflexiones resultantes ocurren en muchas direcciones distintas. Si se observa a pequeña escala, la superficie a menudo se puede considerar como un conjunto de reflectores planos o afilados.

2.2.3 Difracción

Se presenta cuando la trayectoria de una onda electromagnética es bloqueada por un obstáculo con bordes relativamente afilados. El efecto de la difracción es rellenar la sombra generada por el bloqueo.

2.2.4 Refracción

Es la alteración de la dirección de desplazamiento de la onda a medida que la porción transmitida ingresa de un material a otro o penetra la superficie.

2.2.5 Absorción

En cualquier momento que una onda electromagnética choca con material que no sea el espacio libre, habrá una cierta pérdida de intensidad (energía), es decir, la materia capta la radiación la cual puede transformarse en calor o energía eléctrica. (Rappaport, 2002)

2.3 Características de Antenas

Todo sistema inalámbrico debe emplear una antena para irradiar y recibir energía electromagnética. La antena es el transductor entre el sistema y el espacio libre y, a veces, se la denomina interfaz aire. Si bien el tratamiento integral del tema de las antenas está fuera del alcance de este trabajo, es útil desarrollar una comprensión intuitiva sobre cómo funcionan y proporcionar algunos ejemplos de diferentes arquitecturas de antena.

Existen algunas reglas prácticas útiles para relacionar los parámetros de la antena con el tamaño y la forma de la antena. Para

muchos tipos de antenas es posible estimar la ganancia de las dimensiones físicas o conociendo los anchos de haz de la antena. (Saunders, Aragón, 2007)

Un principio fundamental de las antenas, denominado reciprocidad, establece que el rendimiento de la antena es el mismo, tanto si se considera la radiación como la recepción. La implicación de este principio es que los parámetros de la antena se pueden medir ya sea transmitiendo o recibiendo. Este principio establece que las estimaciones de ganancia de antena, ancho de haz y polarización son las mismas tanto para transmitir como para recibir.

El radiador isotrópico, es una antena ideal que irradia (o recibe) por igual en todas las direcciones, con un patrón de radiación esférico. La densidad de potencia, S , debido a un radiador isotrópico es una función solo de la distancia, d , desde la antena y se puede expresar como la potencia total dividida por el área de una esfera con radio d .

$$S = \frac{P}{4\pi d^2} \quad (2.2)$$

Es decir, la potencia se distribuye uniformemente sobre la esfera. Por lo tanto, para un radiador isotrópico, la densidad de potencia en un rango dado es constante en todos los ángulos y es igual a la densidad de potencia promedio en ese rango.

2.3.1 Ganancia

La ganancia de antena se puede describir como la potencia de salida, en una dirección particular, en comparación con la producida en cualquier dirección por un radiador isotrópico. La ganancia generalmente se expresa en dBi, decibelios relativos a un radiador isotrópico ideal y su expresión viene dada por:

$$G = \eta \frac{\text{Densidad de potencia a máx dirección } d}{P_t/4\pi d^2} \quad (2.3)$$

Donde,

P_t es la potencia aplicada a los terminales de la antena

$4\pi d^2$ es el área de la superficie de una esfera con radio d

η es la eficiencia total de la antena, incluyendo todas las pérdidas de antena.

2.3.2 Área Efectiva

Una antena con apertura es una que utiliza una apertura bidimensional, como una bocina o un reflector parabólico (a diferencia de una antena de cable). La ganancia de ésta, como un reflector parabólico, se puede calcular utilizando un área efectiva o área de captura, que se define como:

$$A_e = \eta A_p \quad (2.4)$$

Donde A_p es el área física de la antena y η es la eficiencia general de la antena (generalmente entre 50% y 80%). La expresión para la ganancia de una antena de apertura es:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (2.5)$$

Si solo se conocen las dimensiones físicas de la antena, se puede asumir una eficiencia de alrededor de 0,6 y estimar la ganancia razonablemente bien para la mayoría de las antenas utilizando la expresión anterior.

2.3.3 Patrón de Radiación

El patrón de radiación de una antena es una representación gráfica de la ganancia de la antena (generalmente expresada en dB) en función del ángulo. Precisamente, este será un patrón bidimensional, una función de los ángulos de azimut y de elevación. Esto se ilustra en la figura 2.1 para una antena de apertura circular.

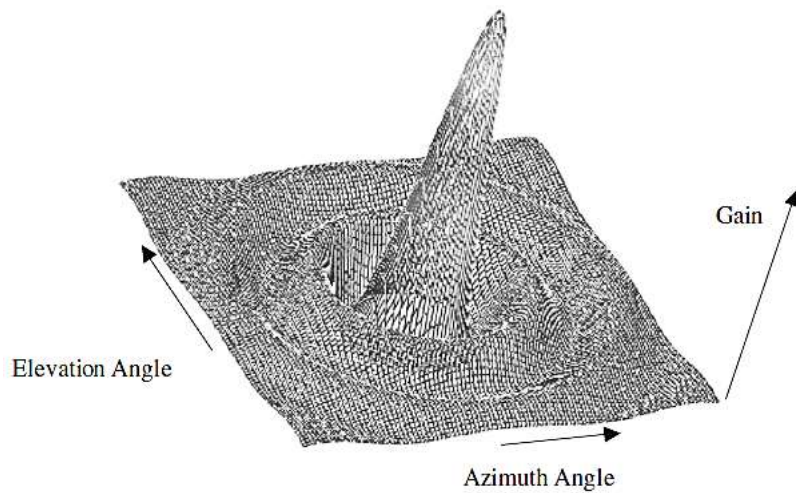


Figura 2.1: Diagrama tridimensional de un patrón de radiación de antena bidimensional.

Fuente: (Seybold, 2005)

La figura 2.2 muestra un patrón de plano principal típico. Los patrones de antena siempre describen el patrón de campo lejano, donde la ganancia o directividad es una función del azimut y los ángulos de elevación y además es independiente de la distancia.

El lóbulo principal de la antena es el lóbulo donde se produce la ganancia máxima. El ancho del haz de una antena se define como la distancia angular entre los dos puntos en el lóbulo principal del patrón de antena que están 3 dB por debajo del punto de ganancia máxima. De la figura 2.2, el ancho de haz de 3 dB de esa antena se puede estimar en alrededor de 5 grados (± 2.5).

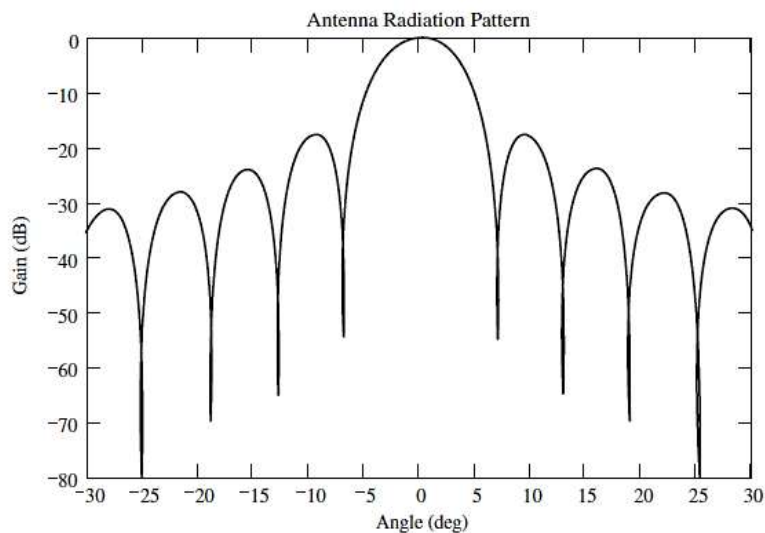


Figura 2.2: Patrón típico de radiación de antena (con ganancia normalizada) en una dimensión.

Fuente: (Seybold, 2005)

Otro parámetro que a menudo es de gran interés es el lóbulo lateral máximo. El patrón en la figura 2.2 muestra un nivel de aproximadamente -17 dB en relación con el pico del haz, que se ha normalizado a una ganancia de 0 dB. Los lóbulos laterales bajos reducen el riesgo de radiación o recepción de señal no deseada, que puede ser valiosa en entornos de alto tráfico o multirutas. Sin embargo, la reducción del lóbulo lateral se obtiene a expensas de ampliar el lóbulo principal y reducir la ganancia de la antena, o al aumentar el tamaño de la antena.

Otra especificación de las antenas direccionales es la relación de frente a fondo. Esta es la relación de la ganancia de la antena para el azimut de 0 y 180 grados. Proporciona una estimación de qué tan bien la antena rechazará las señales de interferencia que llegan desde la parte posterior de la misma. La relación frontal / posterior es un parámetro muy importante cuando se planifica la reutilización de la frecuencia y la reducción de la interferencia.

2.3.4 Polarización

La polarización se define como la orientación del plano que contiene el componente del campo eléctrico de la forma de onda radiada. En muchos casos, la polarización de una antena se puede determinar por

inspección. Por ejemplo, una antena de látigo vertical genera y recibe polarización vertical. De manera similar, si el elemento de la antena es horizontal, la polarización de la onda será horizontal. Las polarizaciones verticales y horizontales se consideran polarizaciones lineales. Otro tipo de polarización es la polarización circular o elíptica.

2.3.5 Impedancia y VSWR

Una antena presenta una impedancia de carga o una impedancia de punto de activación para cualquier sistema que esté conectado a sus terminales. La impedancia del punto de activación es idealmente igual a la resistencia a la radiación de la antena. En la práctica, se pueden incluir pérdidas resistivas dentro de la antena y otros contribuyentes de impedancia compleja, como cableado y conectores dentro de la misma. Es importante ya que se requiere una buena adaptación de impedancia entre el circuito (como un transceptor) y la antena para lograr la máxima transferencia de potencia. Ésta se produce cuando las impedancias del circuito y la antena coinciden.

Si existe un cable entre la antena y el transceptor, la falta de acoplamiento crea una relación de onda estacionaria de voltaje en el cable (VSWR, o a menudo solo SWR). El efecto de un VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) sobre un cable implica aumentar el efecto de la pérdida del mismo. (Seybold, 2005)

2.4 Configuraciones de Antenas

Las posibles configuraciones de una antena están confinadas solo por la imaginación. En el campo de la compatibilidad electromagnética, cualquier conductor es un radiador potencial y puede tratarse como una antena. Existen varias categorías de antenas ampliamente utilizadas.

2.4.1 El Dipolo

El dipolo de media onda se configura como se muestra en la figura 2.3. Por lo general, consta de dos segmentos, cada uno de un cuarto de longitud de onda, con la alimentación en el medio, aunque también se

utilizan dipolos de alimentación offset y de alimentación final. Los anillos en la figura 2.3 ilustran la direccionalidad del patrón de radiación del dipolo. Se puede ver que hay áreas de ganancia reducida en los extremos de los elementos.

La ganancia de un dipolo de media onda es teóricamente de 2.14 dB. En general, la ganancia de la antena se puede especificar en decibelios con respecto a un radiador isotrópico, dBi, o en decibelios con respecto a un dipolo de media onda ideal, dBd.

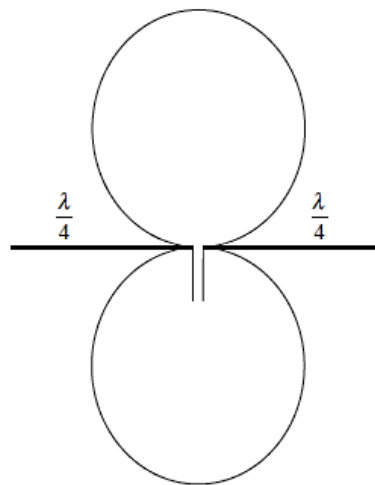


Figura 2.3: La antena dipolo de media onda y su patrón de radiación.

Fuente: (Seybold, 2005)

Un ejemplo de una antena de este tipo es la antena flexible utilizada en muchos radios VHF y UHF de mano. Si bien es conveniente, estas antenas pueden tener una ganancia considerablemente menor que una antena de cuarto de onda regular, del orden de -3dB o más. El uso de la mano y brazo humanos degradan tanto el patrón de radiación como la ganancia. Si la antena se mantiene cerca del cuerpo, como al lado de la cabeza o en la cintura, la ganancia neta puede reducirse aún más en 10 dB o más.

2.4.2 Antenas de Haz

La antena dipolo de media onda también sirve como componente de otra antena popular, la antena de haz Yagi-Uda (Yagi). La antena Yagi está compuesta por un elemento accionado, que es un dipolo de media

onda alimentado por el centro, un elemento reflector, que es ligeramente más largo que el elemento accionado, y (opcionalmente) varios elementos directores que son progresivamente más pequeños que el elemento accionado. Esto se muestra en la figura 2.4.

El haz Yagi es una antena direccional que genera una onda polarizada linealmente. La ganancia y la relación entre la parte delantera y la parte posterior pueden ser sustanciales si se usa un número suficiente de elementos en el diseño.

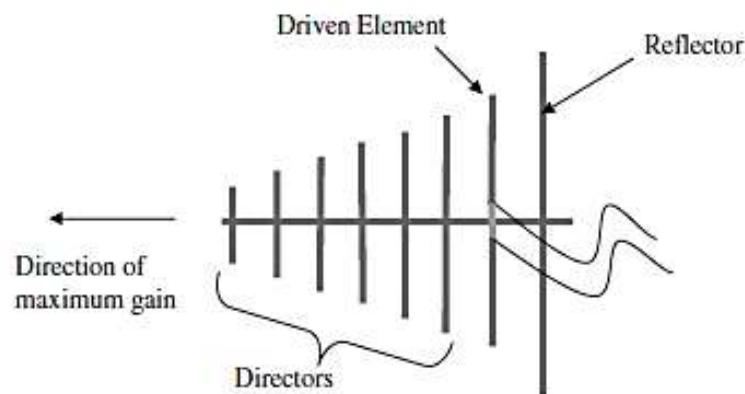


Figura 2.4: Una antena típica Yagi (el estrechamiento en las longitudes del elemento se ha exagerado en esta imagen para mayor claridad).

Fuente: (Seybold, 2005)

La radio móvil utiliza la polarización vertical principalmente por conveniencia porque es difícil montar una antena polarizada horizontalmente en un automóvil o un teléfono, pero también debido a sus propiedades reflectantes.

2.4.3 Antena de Bocina

Una antena de bocina puede considerarse como un extremo curvo de una guía de onda. Una antena de bocina es un ejemplo de una antena de apertura. La polarización de la señal emitida depende de la polarización del transductor de guía de ondas.

Hay varias formas de antenas de bocina, y el estrechamiento y el tamaño de la abertura controlan el patrón de radiación resultante. Las antenas de bocina pueden proporcionar una ganancia muy alta y haces

estrechos, dependiendo de su diseño. Con frecuencia se utilizan como estándares de ganancia o calibración, ya que sus ganancias son muy predecibles y repetibles.

2.4.4 Antenas Reflectoras

Las antenas reflectoras incluyen el reflector parabólico o antena parabólica y la antena Cassegrain (para comunicaciones satelitales). El reflector parabólico tiene un receptor / transmisor montado en una pequeña unidad que generalmente se ubica en el punto focal del plato parabólico.

Además de la pérdida de eficiencia debida a la disminución de la iluminación, los soportes para la alimentación de la antena producen un bloqueo en el campo de visión de la antena. Esto causa sombras y produce lóbulos de difracción en el patrón de la antena.

Un ejemplo de una antena parabólica con alimentación offset es la antena de TV de transmisión directa, como se muestra en la figura 2.5. La alimentación de la antena contiene un amplificador de bajo ruido y un convertidor descendente de banda ancha que cambia todas las señales a la banda L. Por lo tanto, la unidad de alimentación se denomina bloque de bajo ruido (LNB). El bloque de señales de banda L luego viaja a través del cable coaxial hacia el receptor, que selecciona la frecuencia deseada para la demodulación.

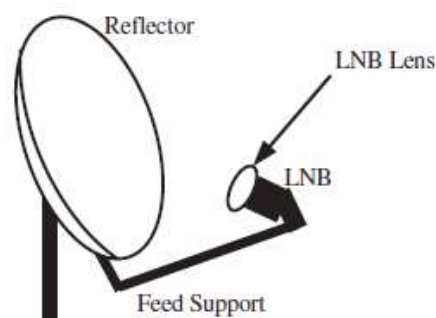


Figura 2.5: Antena reflectora de alimentación offset para TV satelital de transmisión directa.

Fuente: (Seybold, 2005)

2.5 Modelos de Propagación en Zonas Urbanas y Rurales

La planificación de radiofrecuencia para redes como los sistemas de telefonía celular o redes inalámbricas de área local (LAN) es un aspecto clave del despliegue de la red. Una planificación insuficiente puede resultar en un exceso de diseño y recursos desperdiciados o en diseño y un rendimiento deficiente del sistema.

Antes de planificar una red, deben entenderse los parámetros que controlan el rendimiento de cada enlace individual. Los parámetros esenciales son la intensidad de la señal recibida, el ruido que acompaña a la señal recibida y cualquier deterioro adicional del canal más allá de la atenuación, como multipath o interferencia.

Para la planificación del enlace, se prepara un presupuesto de enlace que tiene en cuenta la potencia isotrópica radiada efectiva (EIRP) del transmisor y todas las pérdidas en el enlace antes del receptor (Seybold, 2005). Dependiendo de la aplicación, se debe calcular el piso de ruido en el receptor para determinar el nivel de señal requerido y lograr la detección de la misma.

Muy a menudo los niveles de potencia se expresan en dBm en lugar de dBW debido a los niveles de potencia involucrados. Es importante que la coherencia de las unidades se mantenga a lo largo de un análisis de presupuesto de enlace.

El margen del enlace se obtiene comparando la intensidad de señal recibida (o esperada) con la sensibilidad o el umbral del receptor. Es una medida que indica cuánto margen hay en el enlace de comunicaciones entre el punto de operación y el punto donde el enlace ya no se puede establecer. Se puede encontrar usando:

$$\text{Link margin} = EIRP - L_{Path} + G_{Rx} - TH_{Rx} \quad (2.6)$$

Donde,

EIRP es la potencia efectiva isotrópica radiada en dBW o dBm,

L_{path} es la pérdida total del trayecto, incluidas las pérdidas misceláneas, las reflexiones y los márgenes de desvanecimiento en dB,

G_{Rx} es la ganancia de recepción en dB,

TH_{Rx} es el umbral del receptor o el nivel mínimo de señal recibida que proporcionará un funcionamiento confiable en dBW o dBm.

El margen de enlace disponible depende de muchos factores, incluido el tipo de modulación utilizada, la potencia transmitida, la ganancia neta de la antena, cualquier guía de onda o pérdida de cable entre el transmisor y la antena, y lo que es más importante, la pérdida del trayecto.

2.5.1 Pérdidas por Camino

Entre los elementos de pérdida de trayectoria se incluyen la pérdida de espacio libre, las pérdidas atmosféricas debidas a la absorción de vapor de agua y gases, la precipitación, la pérdida de desvanecimiento debida a las trayectorias múltiples y otros elementos diversos. Dichos efectos basados en la frecuencia y el medio ambiente.

Si la ruta principal se rige por la pérdida de espacio libre, se calcula utilizando la ecuación de pérdida de espacio libre de Friis, que se puede expresar como:

$$L = G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.7)$$

Como se muestra la ecuación de Friis incluye la ganancia de antena de transmisión y recepción. Hablando estrictamente, no es una pérdida de espacio libre, sino que representa una pérdida de trayectoria media o mediana en un entorno con pérdidas, como la propagación cerca de la Tierra.

La ganancia de la antena explica la directividad y su eficiencia, mientras que el término cuadrado de la distancia inversa expresa la propagación del frente de onda esférico (geométrico). La dependencia de

la longitud de onda es un artefacto del uso de la ganancia de la antena de recepción en la ecuación en lugar del área efectiva de la antena.

La ecuación de pérdida de espacio libre de Friis se puede expresar en dB como:

$$L_{dB} = -G_{TdB} - G_{RdB} - 20 \log(\lambda) + 20 \log(d) + 22 \quad (2.8)$$

En muchas aplicaciones, las ganancias de antena se excluyen de la expresión de pérdida de trayectoria, en cuyo caso la pérdida de espacio libre es:

$$L_{FSLdB} = -20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right) \quad (2.9)$$

2.5.2 Ruido

La característica clave del receptor que determina el rendimiento del enlace es el umbral de recepción o la sensibilidad. El umbral es la potencia de señal mínima requerida para un funcionamiento aceptable. Si el umbral no se conoce o no se especifica, entonces se debe proporcionar una relación señal/ruido requerida o una relación de densidad espectral de potencia de bit a potencia de ruido (E_b/N_o) para la operación deseada o la probabilidad de detección.

Para la mayoría de los sistemas terrestres, el ruido se establece por las características del receptor y el ancho de banda. El ruido del receptor es causado por la agitación térmica de los electrones, llamada movimiento browniano, en la parte frontal del receptor. Este ruido se modela como una distribución de amplitud gaussiana. (Goldsmith, 2005)

Además, está modelado considerando una densidad espectral de potencia plana (constante) de $N_o/2$, lo que significa que la densidad de potencia es la misma en todas las frecuencias de interés. Por lo tanto, el ruido térmico generalmente se caracteriza como "blanco".

Finalmente, el ruido térmico es de naturaleza aditiva (es decir, independiente de la señal real involucrada). Por esta razón, se modela

como ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN). La potencia teórica de ruido térmico disponible para una carga acoplada es:

$$N = kT_oB \quad (2.10)$$

Donde:

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K (constante de Boltzman)}$$

$$T_o = 290 \text{ K (ruido de temperatura estándar)}$$

$$B = \text{ancho de banda equivalente al ruido (Hz)}$$

Esto representa la cantidad de potencia de ruido presente en la entrada a un receptor perfecto que es impulsado por una carga compatible (como una antena).

2.5.3 Interferencia

La limitación del ancho de banda en el transmisor, el receptor y/o el canal en sí puede causar que las señales se superpongan en el tiempo. Por lo general, la mayoría de los sistemas de comunicación digital tienen asignaciones de ancho de banda muy estrictas, por lo que los pulsos digitales deben configurarse con cuidado en el transmisor para evitar el desbordamiento del canal.

A medida que el ancho de banda del filtro se vuelve más estrecho y el corte más agudo, los pulsos tienden a extenderse en el tiempo, haciendo que se superpongan. Esto se denomina interferencia entre símbolos (ISI) y puede degradar seriamente el rendimiento.

Si se transmiten múltiples portadoras desde el mismo transmisor, las no linealidades pueden producir productos de intermodulación, que pueden verse como ruido adicional. Un efecto similar ocurre si hay una señal de canal adyacente fuerte que sobrecarga al receptor y produce una operación no lineal (Kaveh, Allen, 2005). La no linealidad produce espuelas en varios múltiplos, sumas y diferencias de las dos frecuencias originales.

Otra fuente de interferencia es la interferencia externa de otros transmisores. Si la interferencia está en la misma frecuencia que la señal de interés, se denomina interferencia cocanal. La interferencia entre canales puede ser causada por armónicos proveniente de un diferente tipo de sistema, radiadores no intencionados o señales de un sistema similar que se encuentran a cierta distancia (compartición de frecuencia). En cada caso, la interferencia se recibe dentro del ancho de banda operativo del receptor como se muestra en la figura 2.6.

La interferencia que está cerca de la frecuencia de la señal se llama interferencia de canal adyacente y puede ser un problema dependiendo de las propiedades espectrales del filtro del receptor. Si los bordes del filtro no están lo suficientemente atenuados, la interferencia puede causar un funcionamiento no deseado. Esto se muestra gráficamente en la figura 2.6.

La respuesta del filtro del receptor normalizado y su ancho de banda de 3 dB se indican junto con espectros representativos para la interferencia de canales adyacentes y de canales compartidos. Dado que la interferencia cocanal entra al receptor en o cerca del centro de su ancho de banda, el filtro del receptor no lo atenúa. Por otro lado, la interferencia del canal adyacente ingresa al receptor a una frecuencia cercana y será atenuada por las faldas del filtro del receptor.

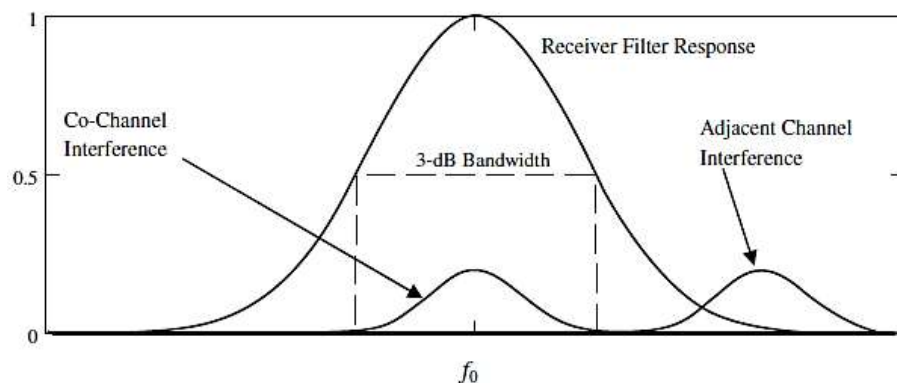


Figura 2.6: Respuesta del filtro del receptor con interferencia co-canal y adyacente.

Fuente: (Seybold, 2005)

Por lo tanto, una reducción más pronunciada en el filtro del receptor reducirá la vulnerabilidad a la interferencia del canal adyacente, con el riesgo de aumentar posiblemente la interferencia entre símbolos. Se incluye un término de margen de interferencia en el presupuesto del enlace. Este término proporciona margen para la degradación del piso de ruido debido a la interferencia externa.

Un margen de interferencia de 1 dB significa que el piso de ruido (ruido más interferencia) será tanto como 1 dB más alto que en un entorno claro. El análisis de interferencia se puede realizar en un enlace con la condición de que la interferencia no debe degradar el piso de ruido en más de 1 dB, a menos que el margen de interferencia se incremente en el presupuesto del enlace. (Seybold, 2005)

2.5.4 Modelo Young

Los datos de Young se tomaron en la ciudad de Nueva York en 1952 y cubren frecuencias de 150–3700 MHz. La curva presentada en la figura 2.7 muestra un comportamiento inverso de la ley de la cuarta potencia. El modelo para los datos de Young es:

$$L_{50} = G_b G_m \left(\frac{h_b h_m}{d^2} \right)^2 \beta \quad (2.11)$$

donde β se denomina factor de desorden. De las mediciones de Young, β es aproximadamente 25dB para la ciudad de Nueva York a 150MHz. Los datos en la figura 2.7 sugieren que un ajuste log-normal a la variación en el nivel de señal promedio es razonable.

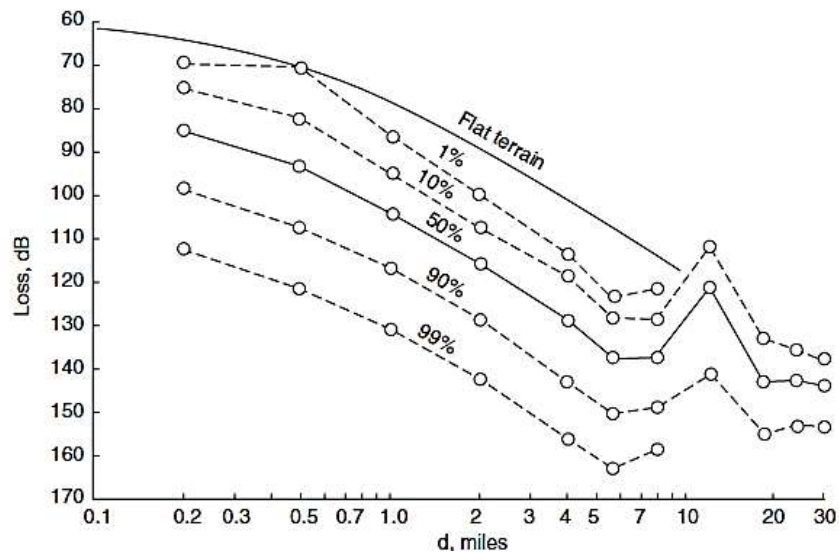


Figura 2.7: Resultados de la medición de Young de pérdida de trayectoria versus la distancia en millas en Manhattan y el Bronx a 150MHz.

Fuente: (Seybold, 2005)

2.5.5 Modelo Okumura

El modelo de Okumura se basa en mediciones realizadas en Tokio en 1960, entre 200 y 1920 MHz. Aunque no son representativas de las ciudades modernas de EE.UU., los datos y el modelo todavía se utilizan ampliamente como base de comparación. El modelo es empírico, basándose únicamente en los datos medidos. Las predicciones de pérdida de la ruta real se realizan en base a los gráficos de los resultados de Okumura, con varios factores de corrección aplicados para algunos parámetros. (Seybold, 2005)

Tal modelo usa el área urbana (ciudad edificada, casas de dos pisos, pueblos, árboles altos y gruesos) como una línea de base y luego aplica factores de corrección para la conversión a otras clasificaciones. También se define una serie de tipos de terreno incluyendo el terreno casi liso el cual es de referencia y los factores de corrección se aplican a otros tipos de superficie. La expresión de Okumura para la pérdida de la trayectoria es:

$$L_{50}(dB) = L_{FSL} + A_{mu} - H_{tu} - H_{ru} \quad (2.12)$$

La ecuación anterior considera la pérdida por espacio libre, un factor de atenuación para áreas urbanas en función de la frecuencia y distancia, y factores de ganancia de alturas de la estación base y de la antena móvil.

2.5.6 Modelo Hata

El modelo Hata (a veces llamado modelo Okumura – Hata) es una formulación empírica que incorpora la información gráfica del modelo Okumura. Hay tres fórmulas diferentes para el modelo Hata: para áreas urbanas, suburbanas y para áreas abiertas.

Tabla 2.2: Ecuaciones de pérdidas para modelo Hata en áreas urbanas, suburbanas y abiertas.

Localidad	Modelo Ecuación
Áreas Urbanas	$L_{50}(dB) = 69.55 + 26.16 \log(f_c) - 13.82 \log(h_t) - a(h_r) + [44.9 - 6.55 \log(h_t)] \log(d) \quad (2.13)$
Áreas Suburbanas	$L_{50}(dB) = L_{50}(urban) - 4.78(\log(f_c))^2 + 18.33 \log(f_c) - 40.94 \quad (2.14)$
Áreas Abiertas	$L_{50}(dB) = L_{50}(urban) - 2 \left(\log\left(\frac{f_c}{28}\right) \right)^2 - 5.4 \quad (2.15)$

Fuente: El Autor

Donde la frecuencia central se considera en el rango de 150 a 1500 MHz, la altura del transmisor entre 30 a 200 metros y la distancia al receptor desde 1 a 20 Km. El factor de corrección de altura de la antena móvil es $a(h_r)$.

La formulación Hata hace que el modelo Okumura sea mucho más fácil de usar y es generalmente la forma en que se aplica el modelo Okumura.

2.5.7 Modelo COST 231

El modelo COST 231 (a veces llamado extensión PCS del modelo Hata) es una versión mejorada del modelo Hata que incluye las

frecuencias 1800–1900 MHz. Mientras que los datos de Okumura se extienden a 1920 MHz, el modelo COST 231 es válido entre 1500 y 2000 MHz.

Los parámetros de cobertura para el modelo COST 231 son frecuencias en el rango de 1.5 y 2 GHz, altura de la estación base transmisora entre 30 y 200 metros, altura de antena receptora móvil de 1 a 10 metros y distancia del enlace superior a 1 e inferior a los 20 Km. La pérdida de la trayectoria media de COST 231 está dada por:

$$L_{50}(dB) = 46.3 + 33.9 \log(f_c) - 13.82 \log(h_t) - a(h_r) + [44.9 - 6.55 \log(h_t)] \log(d) + C \quad (2.16)$$

El modelo COST 231 está restringido a aplicaciones en las que la antena de la estación base está por encima de los techos adyacentes. Hata y COST 231 son fundamentales para la mayoría de las herramientas de planificación de RF comerciales para telefonía móvil.

2.5.8 Modelo Lee

El modelo Lee se desarrolló originalmente para su uso a 900 MHz y tiene dos modos: área a área y punto a punto. A pesar de que los datos originales son algo restrictivos en su rango de frecuencia, la implementación sencilla, la capacidad de adaptarse a los datos empíricos y los resultados que proporciona la convierten en una opción atractiva.

Modo Lee Área-a-Área.- Para la predicción de área a área, Lee usa una pérdida de trayectoria media de referencia en una milla, llamada L_o , la pendiente de la curva de pérdida de trayectoria, γ en dB/década, y un factor de ajuste F_o . La pérdida mediana en la distancia d , es dada por:

$$L_{50}(dB) = L_o + \gamma \log(d) - 10 \log(F_o) \quad (2.17)$$

El modelo de Lee se formuló originalmente como una predicción de nivel de señal recibida basada en un nivel de potencia de transmisión conocido y ganancias de antena. Esto significa que el factor de ajuste de

potencia del modelo original de Lee no es necesario ya que la pérdida de trayectoria es independiente de la potencia de transmisión.

En la tabla 2.3 se dan algunos valores empíricos para la pérdida de trayectoria media de referencia a 1 km y la pendiente de la curva de pérdida de trayectoria. Los datos para cualquier aplicación dada se desviarán de estos datos, pero deben ser del mismo orden de magnitud.

Tabla 2.3: Referencia de Pérdida por Trayectoria del Modelo Lee

Environment	L_0 (dB)	γ
Free space	85	20
Open (rural) space	89	43.5
Suburban	101.7	38.5
Urban areas		
Philadelphia	110	36.8
Newark	104	43.1
Tokyo	124.0	30.5

Fuente: (Seybold, 2005)

Modo Lee punto a punto.- El modo punto a punto incluye un ajuste para la pendiente del terreno. La pérdida de la trayectoria media está dada por:

$$L'_{50}(dB) = L_{50}(dB) - 20 \log \left(\frac{h_{eff}}{30} \right) \quad (2.18)$$

Donde h_{eff} está en metros y se determina extrapolando la pendiente del terreno en el móvil hacia la antena de la estación base y luego calculando la altura de la antena (verticalmente) sobre la línea extrapolada como se muestra en la figura 2.8.

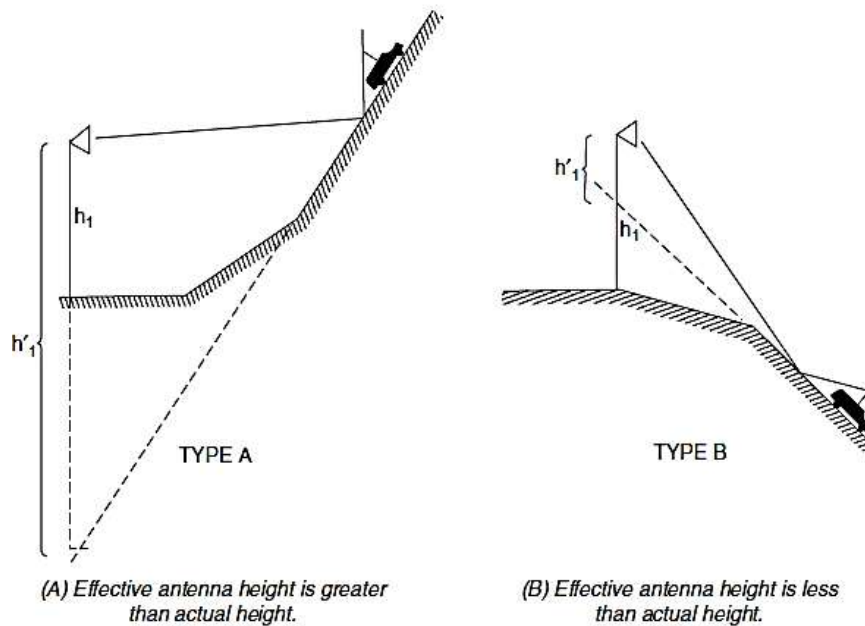


Figura 2.8: Determinación de la altura efectiva de antena de la estación base para el Modelo Lee en el modo Punto a Punto.

Fuente: (Seybold, 2005)

2.6 Desvanecimiento y Caracterización Multitrayecto

Para las comunicaciones terrestres, el desvanecimiento se agrupa generalmente en dos tipos de desvanecimiento: a gran escala y a pequeña escala. El desvanecimiento a gran escala abarca aquellos efectos que cambian la pérdida de ruta cuando la geometría relativa del transmisor y el receptor ha cambiado en varias longitudes de onda o más. Tales efectos incluyen una mayor pérdida de espacio libre, pérdida de rebote en el suelo y sombra.

El desvanecimiento a pequeña escala es el desvanecimiento que se produce debido al movimiento en el orden de una longitud de onda y se atribuye principalmente a las rutas múltiples. Se produce en respuesta a los cambios en la geometría del transmisor al receptor. Se caracteriza como desvanecimiento rápido o lento. (Tse, Viswanath, 2005)

2.6.1 Desvanecimiento de Larga Escala

Generalmente es atribuible al bloqueo (difracción), que a veces se denomina sombreado. En el caso de que haya una buena cantidad de

bloqueo, pueden existir varias rutas de difracción hacia el receptor. Estas rutas son multiplicativas, lo que significa que los efectos son aditivos si se consideran en dB.

Si hay un número suficiente de puntos de difracción y/o vías de acceso múltiples en el camino hacia el receptor, se puede invocar el teorema del límite central para justificar el uso de una variable aleatoria gaussiana para representar la pérdida del camino. De hecho, esto es lo que se hace con frecuencia, particularmente en telefonía celular. El resultado se llama desvanecimiento log-normal, ya que el desvanecimiento sigue una distribución normal en dB.

Por esta razón, el desvanecimiento a gran escala se modela como una variable aleatoria log-normal. La pérdida de la trayectoria media es la misma que la pérdida de la trayectoria media (ya que para una pdf normal, la media y la mediana son idénticas). Por lo tanto, solo una variación es necesaria para caracterizar el desvanecimiento log-normal.

La probabilidad de un desvanecimiento log-normal se usa para determinar el porcentaje de área que se cubre a un rango fijo desde el transmisor. La figura 2.9 muestra la variación de señal recibida versus la posición para una distancia fija, d , a medida que se atraviesa el perímetro de la celda. Los efectos de la pdf normal se pueden imaginar a partir de este plot.

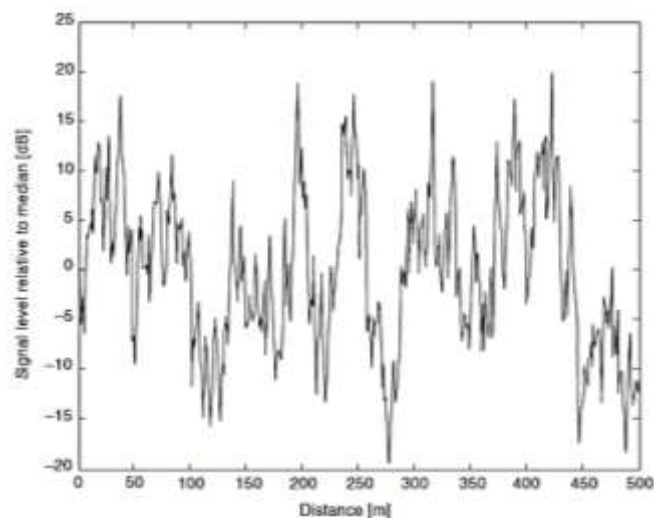


Figura 2.9: Niveles de señal recibidos en relación con el nivel de la señal mediana en ambiente con sombra.

Fuente: (Seybold, 2005)

La figura 2.10 muestra el histograma y cómo se compara con la pdf normal. Esto proporciona una idea de la validez de los modelos de desvanecimiento log-normal. La figura 2.11 muestra un gráfico representativo de las mediciones de pérdida de trayectoria. Esta gráfica muestra la variación de la pérdida de trayectoria a cualquier distancia dada.

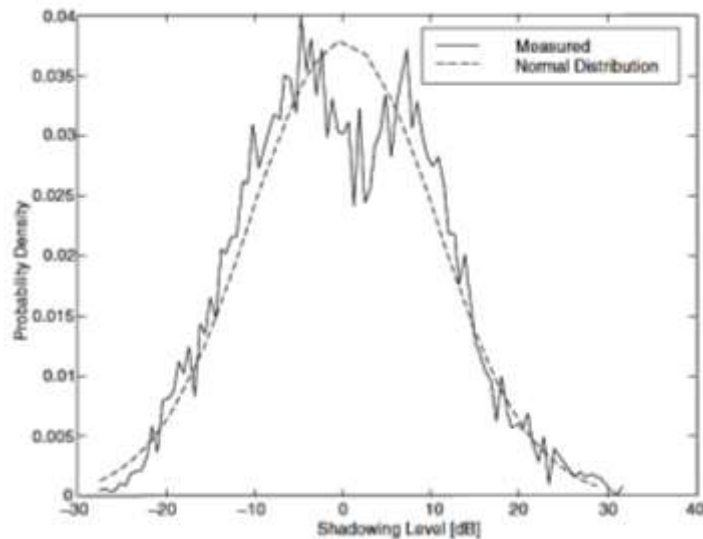


Figura 2.10: Histograma de las mediciones de pérdida de sombra en comparación con una pdf normal.

Fuente: (Seybold, 2005)

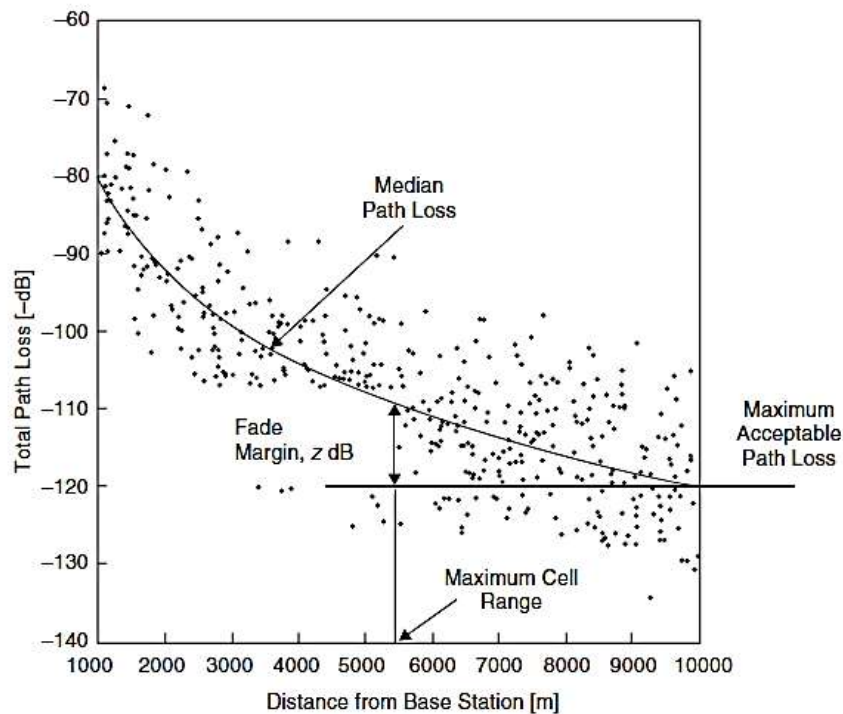


Figura 2.11: Pérdida total del trayecto versus la distancia desde el transmisor en un entorno con desvanecimiento de sombra.

Fuente: (Seybold, 2005)

2.6.2 Desvanecimiento a Pequeña Escala

El desvanecimiento a pequeña escala también se caracteriza por sus propiedades espectrales, tanto planas como selectivas de frecuencia. Las propiedades espectrales del canal están dictadas por la extensión del retardo, la variación en el retardo entre las señales directas y reflejadas. La propagación de retardo excesiva puede conducir a la interferencia entre símbolos. Si el canal se desvanece lentamente y es selectivo a la frecuencia, se puede usar un ecualizador para compensar los efectos espectrales del canal.

Este desvanecimiento abarca toda degradación que puede ocurrir con cambios muy pequeños (en el orden de longitud de onda) en la posición relativa del transmisor y el receptor y, a veces, de los reflectores en el entorno. El fenómeno del desvanecimiento a pequeña escala se atribuye a la suma de múltiples señales reflejadas que llegan con diferentes retardos (fases) y amplitudes. El efecto neto se trata como si tuviera una variable aleatoria gaussiana para los componentes en fase y en cuadratura de la señal recibida.

2.6.2.1 Propagación por Retraso

Existe la denominada ruta directa la cual es el recorrido más corto entre el transmisor y el receptor. Todas las rutas múltiples han viajado distancias mayores y, por lo tanto, se retrasarán en el tiempo en relación con la señal directa. Por lo tanto, la (s) señal (es) reflejada (s) no se alineará (n) con la señal directa (s), y la señal acumulada se distorsionará en el tiempo. Esto se denomina propagación de retardo y se ilustra en la figura 2.12.

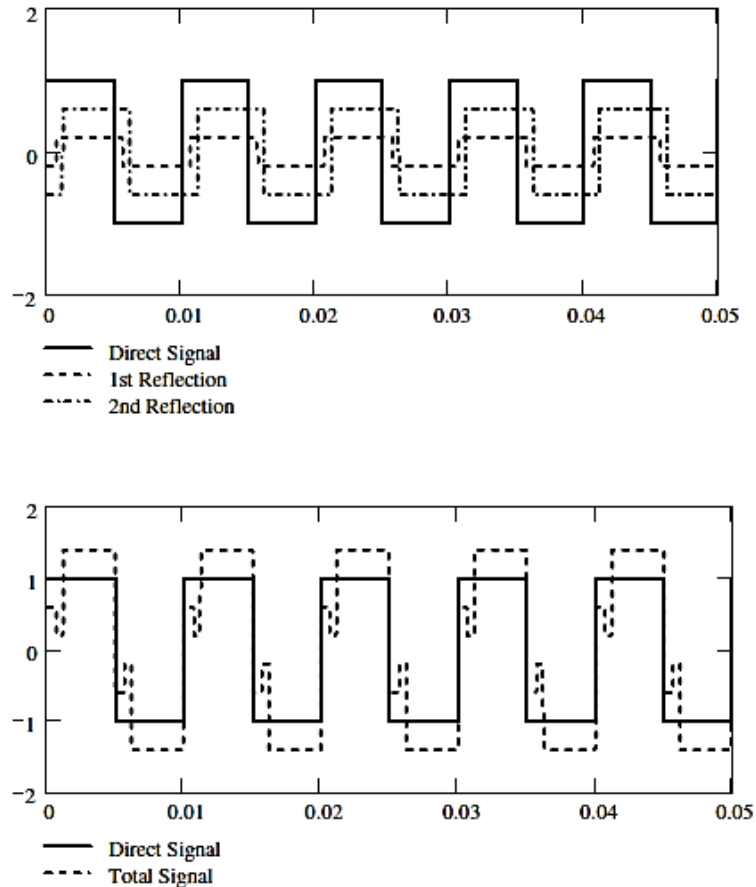


Figura 2.12: Ilustración del efecto de retardo de propagación por trayectos múltiples en los símbolos recibidos.

Fuente: (Seybold, 2005)

La ventana de retardo es el ancho de la porción media del perfil de retardo de potencia, que contiene un cierto porcentaje de la energía en el perfil. El intervalo de retardo (propagación de retardo en exceso) es el período de tiempo entre los dos puntos separados más lejanos donde la respuesta al impulso cae a un nivel de potencia dado.

2.6.2.2 Efecto Doppler

El movimiento relativo entre el transmisor y el receptor imparte un cambio Doppler en la señal, donde todo el espectro de la señal cambia en frecuencia. Cuando el multitrayecto se combina con el movimiento relativo, la onda electromagnética puede experimentar un cambio Doppler positivo y negativo, manchando o extendiendo la señal en frecuencia.

Este efecto se llama propagación Doppler. La figura 2.13 muestra cómo esta propagación podría ocurrir en un entorno de telecomunicaciones móviles urbanas. En esta figura, cuando el automóvil se mueve hacia la derecha, las reflexiones desde la parte delantera del vehículo tendrán un cambio Doppler positivo y la señal de la torre tendrá un cambio Doppler negativo.

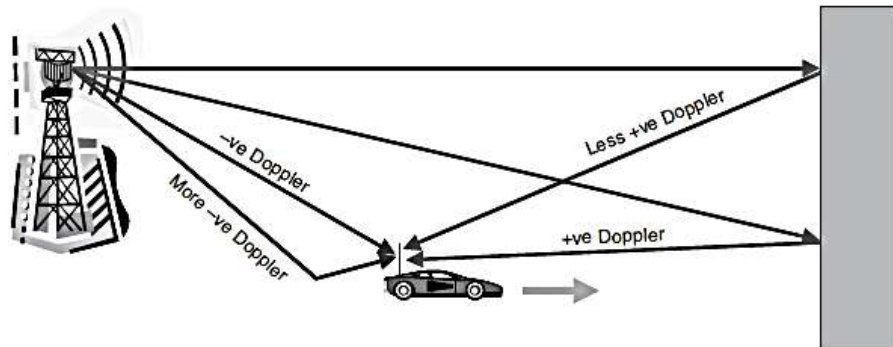


Figura 2.13: Ilustración de cómo la dispersión doppler puede ocurrir.

Fuente: (Seybold, 2005)

La magnitud de los cambios Doppler depende de la geometría de la ruta de la señal (o reflexión como se muestra). Un parámetro relacionado, llamado tiempo de coherencia, se define como el tiempo durante el cual la amplitud de la señal estará altamente correlacionada.

Si el ancho de banda de la señal es mucho más grande que el doble del cambio Doppler máximo, el canal se denomina canal de atenuación lenta y los efectos de la dispersión Doppler son despreciables. Un requisito indispensable es que el tiempo del símbolo debe ser menor que el tiempo de coherencia del canal.

Por lo tanto, la caracterización de la velocidad del desvanecimiento a pequeña escala (rápido o lento) depende de la relación entre el ancho de banda Doppler y el ancho de banda de la señal, o de manera equivalente la relación entre el tiempo de coherencia y el tiempo de símbolo.

Para un canal de desvanecimiento rápido, el receptor debe ser capaz de tolerar los desvanecimientos dentro de un símbolo, lo que hace

que las modulaciones dependientes de la amplitud, como la QAM, sean una mala elección. Sin embargo, para un canal que se desvanece lentamente, se puede suponer que el canal es constante durante un intervalo de símbolos, por lo que se pueden usar modulaciones de amplitud.

2.7 Long Term Evolution

Mientras se desarrollaban y desplegaban los sistemas HSPA, el IEEE 802 LMSC (Comité de Estándares de LAN/MAN) introdujo el estándar IEEE 802.16e para el acceso inalámbrico de banda ancha móvil. Este estándar se introdujo como una mejora a un estándar IEEE 802.16 anterior para el acceso inalámbrico de banda ancha fija. Dicho estándar empleó una tecnología de acceso diferente llamada OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal) y obtuvo mejores tasas de datos y eficiencia espectral que la proporcionada por HSPA. (Khan, 2009)

Aunque la familia de estándares IEEE 802.16 se llama oficialmente WirelessMAN en IEEE, un grupo de la industria llamado theWiMAX Forum lo ha denominado WiMAX (interoperabilidad mundial para acceso por microondas). La misión del Foro WiMAX es promover y certificar la compatibilidad e interoperabilidad de los productos de acceso inalámbrico de banda ancha. El sistema WiMAX que admite movilidad como en el estándar IEEE 802.16e se conoce como MobileWiMAX. Además de la ventaja de la tecnología de radio, MobileWiMAX también empleó una arquitectura de red más sencilla basada en protocolos IP.

La introducción de Mobile WiMAX llevó a 3GPP y 3GPP2 a desarrollar su propia versión de más allá de los sistemas 3G basados en la tecnología OFDMA y la arquitectura de red similar a la de MobileWiMAX. El sistema 3G más allá en 3GPP se denomina Acceso a Radio Terrestre Universal Evolucionado (E-UTRA) y también se lo conoce ampliamente como LTE, mientras que la versión de 3GPP2 se llama UMB (banda ancha ultra móvil) como se muestra en la figura 2.14.

Cabe señalar que los tres sistemas más allá de los sistemas 3G, Mobile WiMAX, LTE y UMB cumplen con los requisitos de IMT-2000 y, por lo tanto, también forman parte de la familia de estándares IMT-2000.

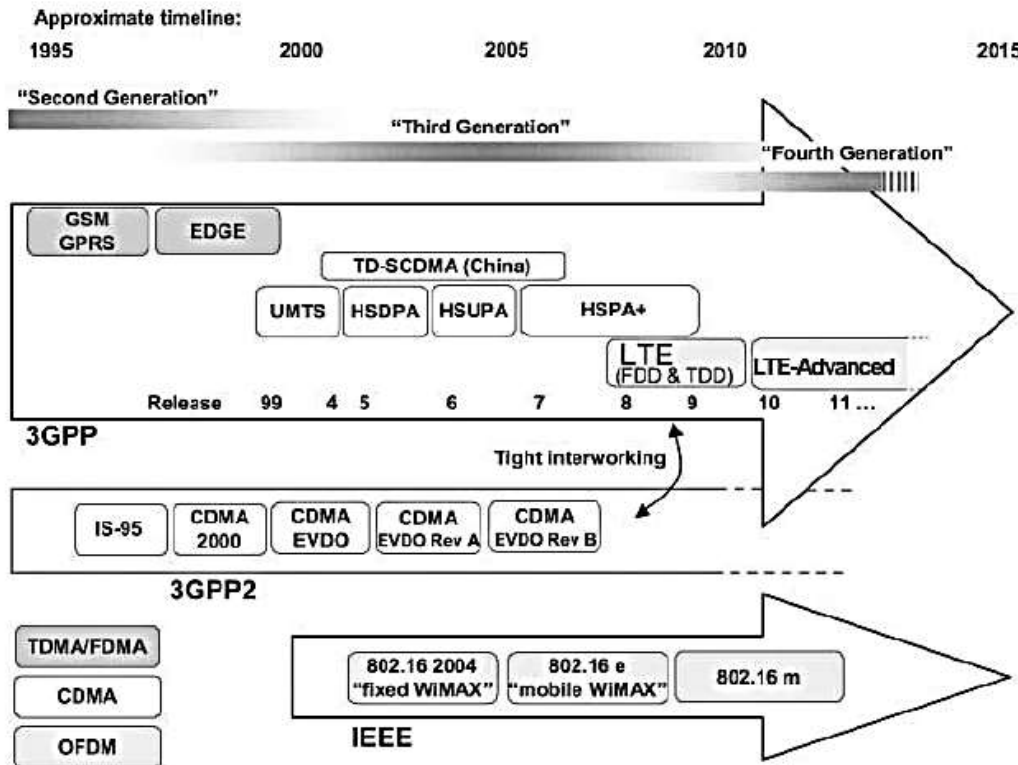


Figura 2.14: Cronología aproximada del panorama de estándares de comunicaciones móviles.

Fuente: (Sesia et al., 2011)

La trayectoria de evolución mostrada en la figura anterior es la desarrollada en el Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3GPP), que actualmente es el grupo de desarrollo de estándares dominante para sistemas de radio móviles.

Dentro del seguimiento de la evolución del 3GPP, son evidentes tres tecnologías de acceso múltiple: la familia GSM/GPRS/EDGE de "Segunda Generación" se basó en el Acceso Múltiple por División de Tiempo y Frecuencia (TDMA/FDMA); la familia UMTS 'Tercera Generación' marcó la entrada de Acceso Múltiple por División de Código (CDMA) en la pista de evolución del 3GPP, y se hizo conocida como CDMA de banda ancha (debido a su ancho de banda de portadora de 5

MHz) o simplemente WCDMA; finalmente, LTE ha adoptado la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), que es la tecnología de acceso que domina las últimas evoluciones de todos los estándares de radio móvil.

Al continuar la progresión tecnológica de las familias de tecnología GSM y UMTS dentro de 3GPP, se puede considerar que el sistema LTE completa la tendencia de expansión de la provisión de servicios más allá de las llamadas de voz hacia una interfaz aérea multiservicio. Este ya era un objetivo clave de UMTS y GPRS/EDGE, pero LTE se diseñó desde el principio con el objetivo de evolucionar la tecnología de acceso de radio bajo el supuesto de que todos los servicios serían conmutados por paquetes.

Además, LTE está acompañada por una evolución de los aspectos no relacionados con la interfaz radio del sistema completo, bajo el término "Evolución de la Arquitectura del Sistema" (SAE) que incluye la red de Evolved Packet Core (EPC). Juntos, LTE y SAE comprenden el Sistema de paquetes evolucionados (EPS), donde tanto la red central como el acceso de radio están completamente conmutados por paquetes. (Sesia et al., 2011)

2.7.1 Aspectos Claves de LTE

La discusión de los requisitos clave para el nuevo sistema LTE condujo a la creación de un "ítem de estudio" formal en 3GPP con el objetivo específico de "evolucionar" la tecnología de acceso por radio para garantizar la competitividad en un plazo de diez años. Bajo los auspicios de dicho estudio, los requisitos para la versión 8 de LTE se depuraron y cristalizaron, finalizándose en Junio de 2005.

El Informe Técnico 3GPP 25.913 define los objetivos clave de LTE como:

- Retrasos reducidos; en términos de establecimiento de la conexión, latencia de transmisión, tiempo de ida y vuelta menor a 10 ms;

- Mayores tasas de datos de usuario; velocidad máxima de datos de enlace descendente de 100 Mbps cuando se utilizan 2 antenas de recepción en el UE;
- Velocidad de datos de enlace ascendente máxima de 50 Mbps cuando se utiliza una antena de transmisión en el UE;
- Mayor velocidad binaria en el borde de la celda, para la uniformidad de la prestación del servicio;
- Costo por bit reducido, lo que implica una eficiencia espectral mejorada;
- Mayor flexibilidad en el uso del espectro, tanto en las bandas nuevas como en las preexistentes; soporte para un ancho de banda de transmisión flexible de hasta 20 MHz;
- Arquitectura de red simplificada;
- Movilidad sin problemas, incluso entre diferentes tecnologías de acceso por radio;
- Consumo de energía razonable para el terminal móvil;
- La eficiencia del espectro promedio del enlace descendente mejoró de 3 a 4 veces en relación con la versión 6 HSDPA;
- La eficiencia del espectro promedio del enlace ascendente mejoró de 2 a 3 veces en relación con la versión 6 de HSUPA; (Johnson, 2012)

LTE tiene una arquitectura plana que minimiza el número de elementos de red. Está optimizado para servicios de Conmutación de paquetes (PS), pero incluye funcionalidad para manejar servicios de Conmutación de circuitos (CS), por ejemplo CS Fall Back a UMTS. LTE es compatible con el servicio de voz mediante voz sobre IP. De lo contrario, se puede admitir el servicio de voz permitiendo que el UE retroceda a UMTS, GSM o CDMA2000.

LTE es compatible con los servicios de difusión múltiple multimedia (MBMS) para la transmisión de TV móvil. Se han estandarizado las versiones Dúplex de División de Frecuencia y Dúplex de División de Tiempo de LTE. Ambos permiten anchos de banda de canal de hasta 20 MHz.

LTE permite el interfuncionamiento con las tecnologías GSM, UMTS y CDMA2000 existentes. Utiliza esquemas de modulación QPSK, 16QAM y 64QAM con tecnologías de acceso múltiple OFDMA (enlace descendente) y SC-FDMA (enlace ascendente). Es compatible con la tecnología de antena de entrada múltiple de salida múltiple (MIMO) en la dirección del enlace descendente.

Las versiones 8 y 9 de 3GPP no admiten MIMO en la dirección del enlace ascendente. LTE simplifica la planificación de la red al minimizar el requisito de listas de vecinos planificadas manualmente. Incluye la funcionalidad de red de auto organización (SON) para ayudar a automatizar la configuración de red, la optimización, la búsqueda de fallas y el manejo de fallas.

LTE Advanced comienza a partir de la versión 10 de 3GPP. Presenta la agregación de portadoras para proporcionar anchos de banda de canal más amplios y efectivos. También introduce MIMO en la dirección del enlace ascendente, así como también aumenta el número de elementos de antena que se pueden usar para MIMO en la dirección del enlace descendente.

Otras tecnologías continúan desarrollándose en paralelo a LTE, por ejemplo, UMTS introduce HSPA + con MIMO, 64QAM y la transmisión multiportadora, lo que permite anchos de banda de canal efectivos de 10, 20 y 40 MHz. En la tabla 2.4 se muestra un resumen de las características claves para LTE versión 8. (Khan, 2009)

Tabla 2.4: Sumario del rendimiento clave para LTE Release 8.

		Absolute requirement	Release 6 (for comparison)	Comments
Downlink	Peak transmission rate	> 100 Mbps	14.4 Mbps	LTE in 20 MHz FDD, 2 × 2 spatial multiplexing. Reference: HSDPA in 5 MHz FDD, single antenna transmission
	Peak spectral efficiency	> 5 bps/Hz	3 bps/Hz	
	Average cell spectral efficiency	> 1.6–2.1 bps/Hz/cell	0.53 bps/Hz/cell	LTE; 2 × 2 spatial multiplexing, Interference Rejection Combining (IRC) receiver [3]. Reference: HSDPA, Rake receiver [4], 2 receive antennas
	Cell edge spectral efficiency	> 0.04–0.06 bps/Hz/user	0.02 bps/Hz/user	As above, 10 users assumed per cell
	Broadcast spectral efficiency	> 1 bps/Hz	N/A	Dedicated carrier for broadcast mode
Uplink	Peak transmission rate	> 50 Mbps	11 Mbps	LTE in 20 MHz FDD, single antenna transmission. Reference: HSUPA in 5 MHz FDD, single antenna transmission
	Peak spectral efficiency	> 2.5 bps/Hz	2 bps/Hz	
	Average cell spectral efficiency	> 0.66–1.0 bps/Hz/cell	0.33 bps/Hz/cell	LTE: single antenna transmission, IRC receiver [3]. Reference: HSUPA, Rake receiver [4], 2 receive antennas
	Cell edge spectral efficiency	> 0.02–0.03 bps/Hz/user	0.01 bps/Hz/user	As above, 10 users assumed per cell
System	User plane latency (two way radio delay)	< 10 ms		LTE target approximately one fifth of Reference.
	Connection set-up latency	< 100 ms		Idle state → active state
	Operating bandwidth	1.4–20 MHz	5 MHz	(initial requirement started at 1.25 MHz)
	VoIP capacity	NGMN preferred target expressed in [2] is > 60 sessions/MHz/cell		

Fuente: (Sesia et al., 2011)

2.7.2 Tecnologías de LTE

El cumplimiento de la amplia gama de requisitos descritos anteriormente solo es posible gracias a los avances en la tecnología de radio móvil subyacente. A modo de resumen, se describen tres tecnologías fundamentales que han dado forma al diseño de la interfaz de radio LTE: tecnología multiportadora, tecnología de múltiples antenas y la aplicación de conmutación de paquetes a la interfaz de radio. Finalmente, se resumen las combinaciones de capacidades que son compatibles con las diferentes categorías de terminales móviles LTE en las versiones 8 y 9.

2.7.2.1 Tecnología Multiportadora

Adoptar un enfoque multiportadora para el acceso múltiple en LTE fue la primera opción de diseño importante. Después de la consolidación inicial de las propuestas, los esquemas candidatos para el enlace descendente fueron el Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA) y el WCDMA múltiple, mientras que los esquemas candidatos para el enlace ascendente fueron el Acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única (SC-FDMA), OFDMA y WCDMA múltiple.

La elección de esquemas de acceso múltiple se realizó en diciembre de 2005, con la selección de OFDMA para el enlace descendente y SC-FDMA para el enlace ascendente. Ambos esquemas abren el dominio de frecuencia como una nueva dimensión de flexibilidad en el sistema, como se ilustra esquemáticamente en la figura 2.15.

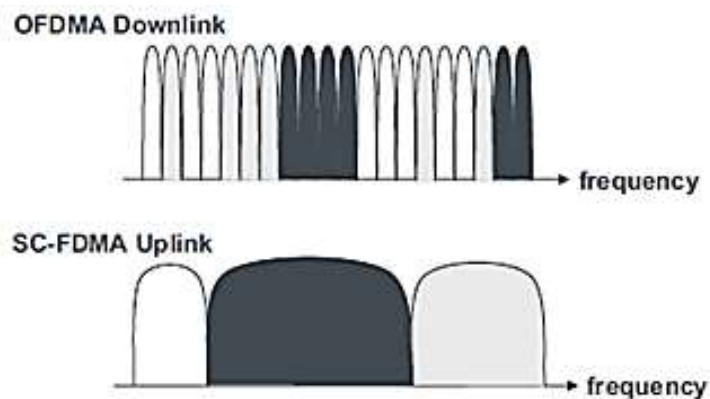


Figura 2.15: Perspectiva del dominio de frecuencia de las tecnologías de acceso múltiple de LTE.

Fuente: (Sesia et al., 2011)

OFDMA extiende la tecnología multiportadora de OFDM para proporcionar un esquema de acceso múltiple muy flexible. OFDM subdivide el ancho de banda disponible para la transmisión de la señal en una multitud de subportadoras de banda estrecha, dispuestas para ser ortogonales entre sí, que individualmente o en grupos pueden transportar flujos de información independientes; en OFDMA, esta subdivisión del

ancho de banda disponible se explota al compartir las subportadoras entre múltiples usuarios.

Esta flexibilidad resultante se puede utilizar de las siguientes maneras:

- Es posible utilizar diferentes anchos de banda de espectro sin cambiar el fundamental del sistema o diseño del equipo;
- Los recursos de transmisión de ancho de banda variable se pueden asignar a diferentes usuarios y programarse libremente en el dominio de la frecuencia;
- Se facilita la reutilización de frecuencia y la coordinación de interferencia entre celdas.

En los últimos años se ha adquirido una amplia experiencia con OFDM gracias a la implementación de sistemas de transmisión de audio y video digitales. Esta experiencia ha destacado algunas de las ventajas claves de OFDM, que incluyen:

- Robustez para canales de radio dispersos en el tiempo, gracias a la subdivisión de la señal transmitida de banda ancha en múltiples subportadoras de banda estrecha, permitiendo que la interferencia entre símbolos se limite en gran medida dentro de un intervalo de guarda al comienzo de cada símbolo;
- Receptores de baja complejidad, aprovechando la ecualización en el dominio de la frecuencia;
- Combinación simple de señales de múltiples transmisores en redes de transmisión.

OFDMA permite que la transmisión OFDM se beneficie de la diversidad de múltiples usuarios. Sobre la base de la información de retroalimentación acerca de las condiciones del canal selectivo de frecuencia de cada usuario, puede realizar la asignación adaptativa de usuario a subportadora, mejorando considerablemente el sistema total y

la eficiencia espectral en comparación con los sistemas OFDM de un solo usuario.

2.7.2.2 Tecnología de Antenas Múltiples

El uso de tecnología de múltiples antenas permite la explotación del dominio espacial como otra nueva dimensión. Esto se vuelve esencial en la búsqueda de mayores eficiencias espectrales. Ésta tecnología abre la puerta a una gran variedad de características, pero no todas cumplen fácilmente sus promesas teóricas cuando se trata de la implementación en sistemas prácticos.

Se pueden usar múltiples antenas de varias maneras, principalmente basadas en tres principios fundamentales, ilustrados esquemáticamente en la figura 2.16:

- *Ganancia de la diversidad.* Uso de la diversidad espacial provista por las múltiples antenas para mejorar la robustez de la transmisión contra el desvanecimiento por trayectos múltiples.
- *Arreglo de Ganancia.* Concentración de energía en una o más direcciones dadas mediante pre-codificación o formación de haz. Esto también permite que múltiples usuarios ubicados en diferentes direcciones sean atendidos simultáneamente (llamado MIMO multiusuario).
- *Ganancia de multiplexación espacial.* Transmisión de múltiples flujos de señal a un solo usuario en múltiples capas espaciales creadas por combinaciones de las antenas disponibles.

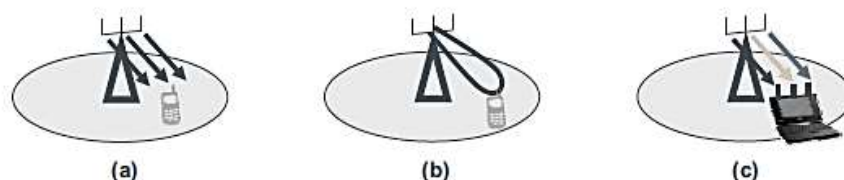


Figura 2.16: Tres beneficios fundamentales de las antenas múltiples: (a) diversidad de ganancia; (b) arreglo de ganancia; (c) ganancia de multiplexación espacial.

Fuente: (Sesia et al., 2011)

Por lo tanto, una gran parte de la fase de elementos de estudio de LTE se dedicó a la selección y el diseño de las diversas funciones de antena múltiple que se incluirán en la primera versión de LTE. El sistema final incluye varias opciones complementarias que permiten la adaptabilidad de acuerdo con el despliegue de la red y las condiciones de propagación de los diferentes usuarios.

2.7.2.3 Interfaz de Radio Conmutada por Paquetes

Como ya se ha señalado, LTE se ha diseñado como un sistema multiservicio completamente orientado a paquetes, sin depender de los protocolos orientados a la conexión por conmutación de circuitos que prevalecen en sus predecesores. En LTE, esta filosofía se aplica a todas las capas de la pila de protocolos.

HSDPA ya abrió la ruta hacia la programación rápida de paquetes a través de la interfaz de radio, lo que permitió la transmisión de paquetes cortos con una duración del mismo orden de magnitud que el tiempo de coherencia del canal de desvanecimiento rápido, como se muestra en la figura 2.17. Esto requiere una optimización conjunta de la configuración de la capa física y la administración de recursos llevada a cabo por los protocolos de la capa de enlace de acuerdo con las condiciones de propagación prevalecientes.

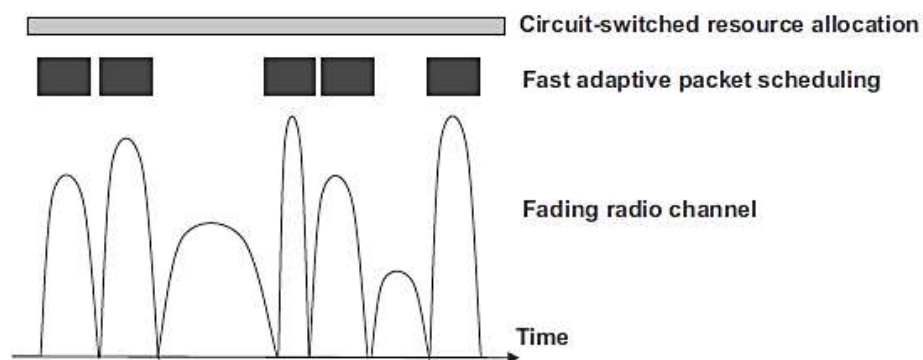


Figura 2.17: Programación rápida y adaptación de enlaces.

Fuente: (Sesia et al., 2011)

Este aspecto de HSDPA implica un acoplamiento estrecho entre las dos capas inferiores de la pila de protocolos, la MAC (capa de control

de acceso al medio) y la capa física. En HSDPA, este acoplamiento ya incluía características como la retroalimentación rápida del estado del canal, la adaptación dinámica del enlace, la programación que explota la diversidad de múltiples usuarios y los protocolos de retransmisión rápida.

En LTE, para mejorar la latencia del sistema, la duración del paquete se redujo aún más desde los 2 ms utilizados en HSDPA hasta solo 1 ms. Este breve intervalo de transmisión, junto con las nuevas dimensiones de frecuencia y espacio, ha ampliado aún más el campo de las técnicas de capa cruzada entre la MAC y las capas físicas para incluir las siguientes técnicas en LTE:

- Programación adaptativa tanto en la frecuencia como en las dimensiones espaciales;
- Adaptación de la configuración MIMO, incluida la selección del número de capas espaciales transmitidas simultáneamente;
- Adaptación de enlace de modulación y velocidad de código, incluido el número de palabras de código transmitidas;
- Varios modos de reporte de estado de canal rápido.

Estos diferentes niveles de optimización se combinan con una señalización de control muy sofisticada.

2.7.2.4 Categorías de Equipos de Usuario

En la práctica, es importante reconocer que el mercado para los UE es grande y diverso, y por lo tanto, existe la necesidad de que LTE admita un rango de categorías de UE con diferentes capacidades para satisfacer diferentes segmentos de mercado. En general, cada segmento del mercado asigna diferentes prioridades a aspectos como la velocidad pico de datos, el tamaño del UE, el costo y la duración de la batería. Algunas compensaciones típicas incluyen lo siguiente:

- El soporte para las tasas de datos más altas es clave para el éxito de algunas aplicaciones, pero generalmente requiere grandes

cantidades de memoria para el procesamiento de datos, lo que aumenta el costo del UE.

- Los UE que pueden estar integrados en dispositivos grandes, como las computadoras portátiles, a menudo no están limitados significativamente en términos de consumo de energía aceptable o el número de antenas que se pueden usar; por otro lado, otros segmentos del mercado requieren terminales de mano ultra delgados que tienen poco espacio para múltiples antenas o baterías grandes.

Cuanto más amplia sea la gama de categorías de UE admitidas, más cercana será la coincidencia entre la funcionalidad soportada de un UE y los requisitos de un segmento de mercado en particular.

Sin embargo, el soporte para un gran número de categorías de UE también tiene inconvenientes en términos de la sobrecarga de señalización requerida para que cada UE informe a la red sobre su funcionalidad soportada, así como un aumento de los costos debido a la pérdida de economías de escala y una mayor complejidad para probar la interoperabilidad de distintas configuraciones.

Las cinco categorías de la Versión 8 UE se resumen en la tabla 2.5. Se puede ver que la categoría más alta de la Versión 8 LTE UE posee capacidades de velocidad pico de datos que exceden los objetivos de la versión 8 de LTE.

Tabla 2.5: Categorías LTE de equipos de usuario en Releases 8 y 9.

	UE category				
	1	2	3	4	5
Supported downlink data rate (Mbps)	10	50	100	150	300
Supported uplink data rate (Mbps)	5	25	50	50	75
Number of receive antennas required	2	2	2	2	4
Number of downlink MIMO layers supported	1	2	2	2	4
Support for 64QAM modulation in downlink	✓	✓	✓	✓	✓
Support for 64QAM modulation in uplink	✗	✗	✗	✗	✓
Relative memory requirement for physical layer processing (normalized to category 1 level)	1	4.9	4.9	7.3	14.6

Fuente: (Sesia et al., 2011)

2.7.3 Arquitectura LTE

La arquitectura de red LTE está diseñada con el objetivo de admitir el tráfico de paquetes conmutados con movilidad sin problemas, calidad de servicio (QoS) y latencia mínima. Un enfoque de conmutación de paquetes permite el soporte de todos los servicios, incluidas las conexiones de voz a través de paquetes.

El resultado es una arquitectura plana altamente simplificada con solo dos tipos de nodo: Node-B evolucionado (eNB) y entidad de gestión de movilidad (MME). Esto contrasta con muchos más nodos de red en la arquitectura de red jerárquica actual del sistema 3G.

Un cambio importante es que el controlador de red de radio (RNC) se elimina de la ruta de datos y sus funciones ahora están incorporadas en el eNB. Algunos de los beneficios de un solo nodo en la red de acceso son la reducción de latencia y la distribución de la carga de procesamiento RNC en varios eNB. La eliminación del RNC en la red de acceso fue posible en parte porque el sistema LTE no admite macro-diversidad. (Khan, 2009; Sesia et al., 2011)

2.7.3.1 La Red de Acceso

La red de acceso de LTE, E-UTRAN, consiste simplemente en una red de varios eNodeB, como se ilustra en la figura 2.18. Para el tráfico de usuario normal (a diferencia de la difusión), no hay un controlador centralizado en E-UTRAN; por lo tanto, se dice que la arquitectura E-UTRAN es plana.

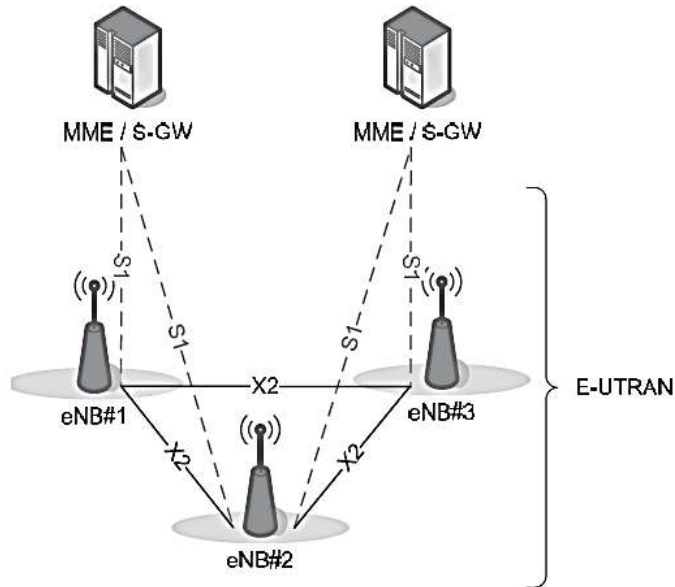


Figura 2.18: Arquitectura General de E-UTRAN.

Fuente: (Sesia et al., 2011)

Los eNodeB están normalmente interconectados entre sí por medio de una interfaz conocida como X2, y al EPC por medio de la interfaz S1, más específicamente, a la MME por medio de la interfaz S1-MME y al S-GW mediante la interfaz S1-U.

La E-UTRAN es responsable de todas las funciones relacionadas con la interfaz radio, que pueden resumirse brevemente como:

- *Gestión de recursos de radio.* Esto cubre todas las funciones relacionadas con los portadores de radio, como el control del portador de radio, el control de admisión de radio, el control de movilidad de radio, la programación y la asignación dinámica de recursos a los UE tanto en el enlace ascendente como en el enlace descendente.
- *Compresión de encabezado.* Esto ayuda a garantizar un uso eficiente de la interfaz de radio al comprimir los encabezados de paquetes IP, que de otro modo podrían representar una sobrecarga significativa, especialmente para paquetes pequeños como VoIP.
- *Seguridad.* Todos los datos enviados a través de la interfaz de radio están cifrados.

- *Posicionamiento.* La E-UTRAN proporciona las mediciones necesarias y otros datos al E-SMLC y ayuda al E-SMLC a encontrar la posición del UE.
- *Conectividad al EPC.* Consiste en la señalización hacia la MME y el camino del portador hacia la S-GW. (Johnson, 2012)

2.7.3.2 La Red Central

La Core Network (CN) o llamada también Evolved Packet Core, es responsable del control general del UE y del establecimiento de los portadores. Los principales nodos lógicos del EPC son:

- Puerta de enlace PDN (P-GW);
- Servidor de GateWay (S-GW);
- Entidad de Gestión de la Movilidad (MME);
- Evolved Serving Mobile Location Center (E-SMLC).

Además de estos nodos, el EPC también incluye otros nodos lógicos y funciones como el Gateway Mobile Location Center (GMLC), el Home Subscriber Server (HSS) y la Política de control de políticas y función de reglas de carga (PCRF). Dado que el EPS solo proporciona una ruta de portador de cierta QoS, el IMS proporciona el control de aplicaciones multimedia, como VoIP.

Cuando un usuario se encuentra en roaming fuera de la red de su país de origen, el dominio P-GW, GMLC e IMS del usuario puede estar ubicado en la red local o en la red visitada. Los bloques del EPC mencionados anteriormente se muestran en la figura 2.19 y se explican con más detalle a continuación.

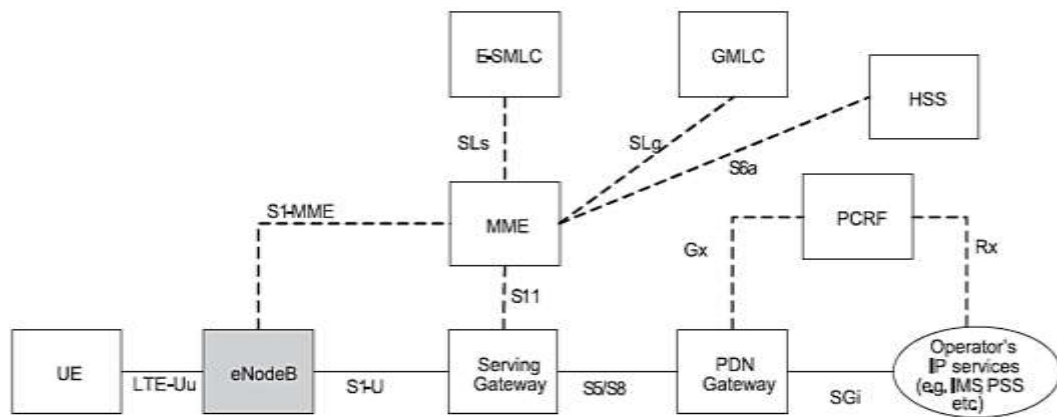


Figura 2.19: Elementos de red del EPC.

Fuente: (Sesia et al., 2011)

- **MME.** La MME es el nodo de control que procesa la señalización entre el UE y la CN. Los protocolos que se ejecutan entre el UE y el CN se conocen como los protocolos del Estrato de No Acceso (NAS).

Las funciones principales admitidas por la MME se clasifican en: Funciones relacionadas con la gestión de portadores. Esto incluye el establecimiento, mantenimiento y liberación de los portadores, y es manejado por la capa de administración de sesión en el protocolo NAS.

Funciones relacionadas con la gestión de la conexión. Esto incluye el establecimiento de la conexión y la seguridad entre la red y el UE, y es manejado por la capa de administración de la conexión o la movilidad en la capa del protocolo NAS.

Funciones relacionadas con el interfuncionamiento con otras redes. Esto incluye la entrega de llamadas de voz a redes heredadas.

- **E-SMLC.** El E-SMLC gestiona la coordinación general y la programación de los recursos necesarios para encontrar la ubicación de un UE que está conectado a E-UTRAN. También calcula la ubicación final en función de las estimaciones que recibe, y calcula la velocidad del UE y la precisión alcanzada.

- *S-GW*. Todos los paquetes IP de usuario se transfieren a través del S-GW, que sirve como el ancla de movilidad local para los portadores de datos cuando el UE se mueve entre los eNodeB. También retiene la información sobre los portadores cuando el UE está en estado inactivo.

Almacena temporalmente los datos del enlace descendente mientras la MME inicia la paginación del UE para establecer los portadores. Además, el S-GW realiza algunas funciones administrativas en la red visitada, como la recopilación de información para cobrar (por ejemplo, el volumen de datos enviados o recibidos del usuario).

También sirve como el ancla de movilidad para el interfuncionamiento con otras tecnologías 3GPP como GPRS y UMTS.

- *PDN Gateway*. Esta entidad tiene la función principal de facilitar conectividad entre la red LTE y las redes externas. Un usuario conectado a la arquitectura LTE se presenta “visible” en la red externa. Por tanto, los paquetes IP otorgados por el usuario transitan en la red externa a través de esta entidad.

Todo el tráfico IP sobre un UE proveniente de una red externa es enrutado hasta el P-GW. (Agusti, Bernardo, Casadevall, Ferrús, Pérez, Sallent, 2010)

2.7.4 Interfaz de Radio

Existen tres procesos para la transferencia de datos y señalización que permite la interfaz radio: difusión de señalización de control, envío de señalización de paquetes IP controlados y transferencia de señalización de control dedicada entre un equipo de usuario y el eNodeB.

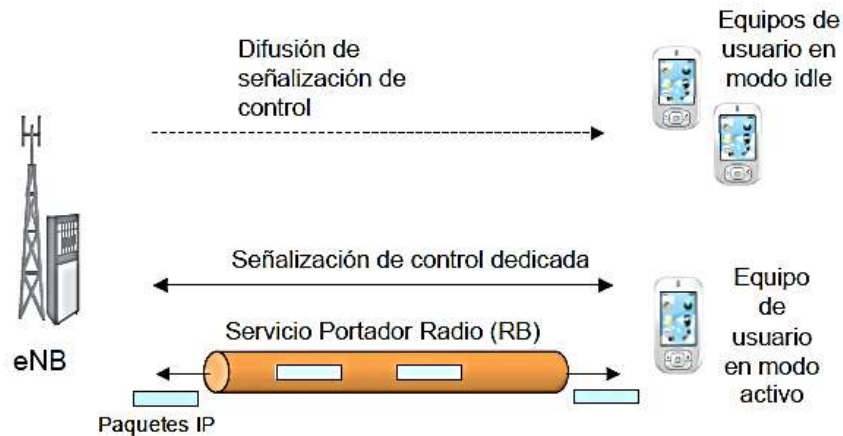


Figura 2.20: Ilustración de los mecanismos de transferencia de información en la interfaz radio.

Fuente: (Agusti et al., 2010)

Los tres mecanismos mencionados se muestran en la figura 2.20 y se detallan a continuación:

Difusión (broadcast) de señalización de control en la zona de cobertura de la celda. Este proceso hace posible la detección y presencia del enodeB mediante las tramas de señalización e información enviadas al UE. Entre los parámetros que se reciben se encuentran la potencia máxima permitida de transmisión UE, dígitos de identificación de operadores de red, entre otros. El broadcast de información pertenece en parte a la red de Estrato de Acceso (AS) y a la red troncal denominada NAS (*non Access stratum*).

Servicio Portador Radio (RB). Cuando se establece esta conexión es posible la transferencia de paquetes IP de los usuarios a través de la interfaz de radio. Este mecanismo se conoce también como servicios portadores radio (Radio Bearers, RB). Cabe resaltar que el servicio de RB de E-UTRAN tiene la función específica para transportar tráfico IP y no admiten la inclusión de protocolos como paquetes X.25, tramas Ethernet, etc. Otra característica es la capacidad de comprimir las cabeceras de paquetes IP con el objetivo de reducir la trama de bytes recibidos por la interfaz radio.

Señalización de control dedicada. Mecanismos que realizan la conexión y transferencia de la señalización para el control entre el eNodeB y el UE. El establecimiento de dicha conexión resulta indispensable para lograr la gestión y requerimientos de servicios de radio portadores como por ejemplo para efectuar toda tarea de señalización con la red troncal. El protocolo involucrado en este proceso es el Radio Resource Control (RRC). A través del protocolo RRC se gestionan los siguientes procesos:

- Establecimiento, modificación y liberación de los servicios portadores de radio entre el eNodeB y el UE.
- El control y envío de mediciones de radio desde los terminales hacía el eNodeB.
- Control sobre el proceso de handover, Incluyendo el estado de movilidad del UE en modo conectado (en modo idle no se realiza movilidad).

2.7.4.1 Interfaz S1

La interfaz también conocida como S1-U (S1 User Plane o S1 bearer), facilita el envío de datos del usuario entre las entidades eNodeB y S-GW. El servicio no garantiza la entrega (basado en UDP) ya que no posee componentes de control de errores ni de flujo. Del mismo modo el sistema gestiona procedimientos de control entre los elementos eNodeB y MME mediante el plano de control S1-MME o S1-C. (Figura 2.21)

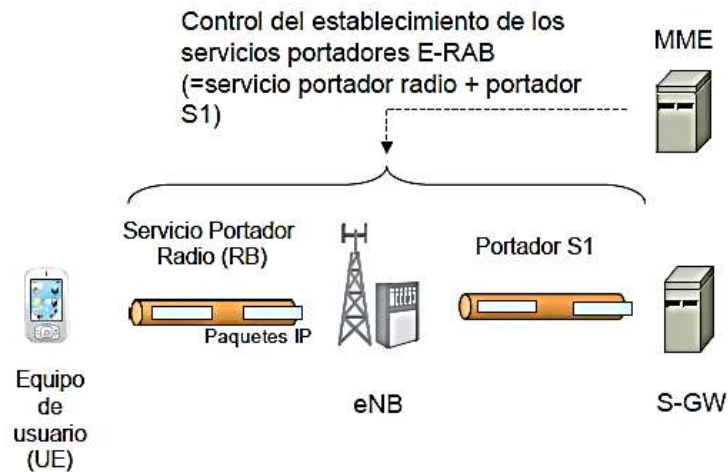


Figura 2.21: Control de los servicios portadores radio y S1 a través de la interfaz S1-MME.

Fuente: (Agusti et al., 2010)

Los procedimientos más destacados que gestionan las sesiones en la interfaz se destacan los siguientes:

- Procedimientos para establecimiento, modificación y liberación de recursos de los servicios portadores tanto en la interfaz radio (servicio portador radio o RB) como en la interfaz S1.
- Instrucciones de handover entre eNodeB. Cuando no existe la interfaz X2, la interfaz S1 tiene la capacidad de establecer un nuevo contexto si la E-UTRAN toma la decisión de traslape en el transcurso de una sesión, efectuando el handover y manteniendo los servicios de radio.
- Procesos de Paging. Los procedimientos de aviso permiten la gestión de la localización de UE interconectados en la red LTE. Permite conocer ciertos parámetros de seguimiento y ubicación virtual, como por ejemplo códigos de Tracking Area.

2.7.4.2 Interfaz X2

Al igual que la interfaz S1, el plano de usuario de la interfaz X2 provee un servicio de transmisión de tramas de usuario entre varios eNodeB interconectados considerando la entrega sin garantía y sin soporte de elementos de control de errores y de flujo.

El procedimiento de entrega de datos de usuario se efectúa únicamente en el transcurso de handover. Los paquetes de usuario alojados en el nodo de partida se traspasan al nuevo eNodeB nuevo. El eNodeB antiguo contiene un buffer de transmisión el cual tiene almacenados paquetes IP de usuario para retransmitir durante el traspaso.

En cuanto al plano de control, entre sus características y mecanismos soportados en la interfaz X2 destacan los procesos de handover entre eNodeBs. En efecto, a través del plano de control se efectúa la entrega del contexto de un usuario del eNodeB antiguo hacia el nuevo y a la vez se controla el proceso de transferencia de datos IP en el plano de usuario de X2 (Sesia et al., 2011).

2.7.5 Mediciones E-UTRAN

Para la movilidad dentro de E-UTRAN y de otras RAT hacia E-UTRAN, se definen dos mediciones principales: RSRP, RSSI y RSRQ.

2.7.5.1 Señal de Referencia de Potencia Recibida (RSRP)

RSRP es medido por el UE sobre las señales de referencia (RS) dentro del ancho de banda de medición durante un período de tiempo. Es un tipo de parámetro de intensidad de señal y es indicativo de la cobertura celular. El RSRP proporciona una estimación de la potencia promedio recibida de un elemento de recurso de señal de referencia específico de una celda.

La medición de potencia (en vatios) se basa en la energía recibida durante la parte útil del símbolo OFDMA y excluye la energía del prefijo cíclico. El punto de referencia para la medición RSRP es el conector de antena del UE. Puede basarse en la señal de referencia específica de la celda transmitida solo por el primer puerto de antena. Alternativamente, RSRP puede basarse en la señal de referencia específica de celda transmitida por el primer y segundo puerto de antena.

Las mediciones RSRP se utilizan para la selección de celdas, la reelección y el handover. También se utiliza para estimar la pérdida de

trayectoria para los cálculos de control de potencia. Para lograr adquirir esta medida, el UE debe estar sincronizado con la celda objetivo.

Se requiere que el UE sea capaz de medir el RSRP de al menos 8 celdas intra-frecuencia identificadas a lo largo del período de medición de la capa física. Del mismo modo, el UE también se requiere para medir RSRP de al menos 4 celdas inter-frecuencia identificadas por la portadora inter-frecuencia para hasta 3 portadoras (es decir, un total de 12 celdas entre frecuencias).

El primordial objetivo de RSRP será establecer (considerando sólo el downlink) en cada píxel la mejor celda que le dará cobertura, discriminando las de menor RSRP y seleccionar la mejor como la celda de servicio.

2.7.5.2 Indicador de Potencia de la Señal Recibida (RSSI)

El RSSI es la potencia total recibida (en vatios) observada por el terminal, incluida la interferencia de todas las fuentes, de las celdas de servicio y no de servicio, la interferencia del canal adyacente y el ruido térmico. A diferencia de RSRP, se mide en todos los elementos de recurso en los símbolos OFDM que contienen la RS para el puerto de antena 0, dentro del ancho de banda de medición.

2.7.5.3 Señal de Referencia de Calidad Recibida (RSRQ)

Este parámetro intenta proveer una estimación de la calidad recibida desde una celda en particular. RSRQ se define como:

$$RSRQ = \frac{RSRP}{(RSSI / N)} \quad (2.19)$$

Donde, N es el número de Bloques de recursos sobre los que se mide el tanto el RSRP y el RSSI. Este componente RSSI de interferencia permite al UE cuantificar la calidad de la señal recibida considerando tanto la intensidad de la señal como la interferencia. Por lo tanto, el RSRQ es una estimación de la relación señal a ruido más interferencia censada por el UE para una celda objetivo específica. (Agusti et al., 2010)

Las mediciones de RSRQ se utilizan como entradas para algoritmos de decisión de selección, reelección de celda y handover. En la primera versión de LTE (versión 8), RSRQ solo era aplicable en estado RRC_CONECTADO. Por lo tanto, se utiliza para el traspaso dentro de E-UTRAN, y de otras RAT a E-UTRAN.

Sin embargo, para evitar interrupciones causadas por situaciones de alta interferencia, en la versión 9, RSRQ también se introdujo para el estado RRC_IDLE; esto le da a la red la opción de configurar el UE para usar RSRQ como una métrica para realizar la reelección de celda, al menos en los casos de reelección de celda dentro de E-UTRAN, desde UTRAN FDD a E-UTRAN y desde GSM a E-UTRAN.

El RSRQ y el RSRP juntos han demostrado ser particularmente beneficiosos para realizar el traspaso basado en la calidad entre frecuencias. RSRQ es inherentemente una cantidad relativa que, en cierta medida, elimina los errores de medición absolutos y conduce a una mejor precisión de la que es posible para RSRP. (Agusti et al., 2010; Johnson, 2012)

2.7.6 Estimación de canal en Down Link

En cuanto a la estimación del canal en downlink (DL), el eNodeB configura a los terminales para que realicen envíos periódicos del estado del canal (channel status reports, CSR) de todo el ancho de banda programado o de una determinada sub banda. En concreto, el envío de CSRs por parte de los terminales se puede configurar de forma periódica o a demanda según el criterio del eNodeB.

Los CSRs se envían a través del canal PUSCH o, en su defecto, a través del PUCCH. Es importante destacar que cada CSR no contiene información del estado del canal que percibe un usuario en DL, sino que contiene una recomendación por parte del terminal de los parámetros de transmisión para el DL más adecuados en función del canal percibido (típicamente la SINR). (ETSI 3GPP, 2018)

Así, el CSR puede contener la siguiente información:

- CQI - Indicador del estado del canal,
- RI - Indicador del rango, y;
- PMI - Identificador de la matriz de pre codificación.

De estos mecanismos de información, el indicador principal es el CQI ya que representa la modulación y codificación en base al estado del canal medido, donde el CQI indexa una tabla con una serie de esquemas de modulación y codificación predefinidos. (Tabla 2.6)

El indicador CQI hace posible puntualizar hasta 16 posibles esquemas de modulación y codificación. Por lo tanto, este parámetro informa al eNodeB sobre los distintos valores a utilizar en el proceso de adaptación del enlace. El eNodeB estará en la capacidad de configurar cualquier esquema de modulación cuyo índice sea inferior o igual al indicado en la tabla del CQI.

Cuando el UE funciona en modo MIMO, el RI determina cuál es el número adecuado de capas a considerar en el esquema de multiplexado espacial. La periodicidad y la resolución de frecuencia que debe utilizar un UE para informar CQI están controladas por eNodeB. En el dominio del tiempo, se admiten informes de CQI periódicos y aperiódicos. (Sesia et al., 2011)

Tabla 2.6: Niveles de CQI, tasas de código y eficiencia bit/símbolo.

CQI index	Modulation	Approximate code rate	Efficiency (information bits per symbol)
0	'Out-of-range'	—	—
1	QPSK	0.076	0.1523
2	QPSK	0.12	0.2344
3	QPSK	0.19	0.3770
4	QPSK	0.3	0.6016
5	QPSK	0.44	0.8770
6	QPSK	0.59	1.1758
7	16QAM	0.37	1.4766
8	16QAM	0.48	1.9141
9	16QAM	0.6	2.4063
10	64QAM	0.45	2.7305
11	64QAM	0.55	3.3223
12	64QAM	0.65	3.9023
13	64QAM	0.75	4.5234
14	64QAM	0.85	5.1152
15	64QAM	0.93	5.5547

Fuente: (Sesia et al., 2011)

2.7.7 Bandas de Frecuencias

La interfaz radio LTE es relativamente independiente de la banda de despliegue. En principio se puede desplegar en las bandas ya establecidas para IMT-2000 como en otras nuevas bandas que puedan aparecer en el futuro. Tanto las bandas asignadas e identificadas para LTE, como futuras bandas pueden ser configuradas tanto para despliegues FDD o para despliegues TDD. (Agusti et al., 2010)

La tabla 2.7 muestra las bandas de operación que se han registrado hasta el momento para LTE.

Tabla 2.7: Bandas mejor identificadas para el despliegue de LTE.

E-UTRA Band	Duplex-Mode	f (MHz)	Enlace ascendente (UL) BS recibido UE transmitido (MHz)	Enlace descendente(DL) BS transmitido UE recibido (MHz)	Dúplex espaciado (MHz)
1	FDD	2100	1920 – 1980	2110 – 2170	190
2	FDD	1900	1850 – 1910	1930 – 1990	80
3	FDD	1800	1710 – 1785	1805 – 1880	95
4	FDD	1700	1710 – 1755	2110 – 2155	400
5	FDD	850	824 – 849	869 – 894	45
6	FDD	850	830 – 840	875 – 885	45
7	FDD	2600	2620 – 2690	120	5, 10, 15, 20
8	FDD	900	925 – 960	45	1.4, 3, 5, 10
9	FDD	1800	1749.9 – 1784.9	1844.9 – 1879.9	95
10	FDD	1700	1710 – 1770	2110 – 2170	400
11	FDD	1500	1475.9 – 1495.9	48	5, 10
12	FDD	700	729 – 746	30	1.4, 3, 5, 10
13	FDD	700	746 – 756	-31	5, 10
14	FDD	700	758 – 768	-30	5, 10
15	FDD	2600	2600 – 2620	700	5, 10
16	FDD	2600	2585 – 2600	575	5, 10, 15
17	FDD	700	704 – 716	734 – 746	30
18	FDD	850	815 – 830	860 – 875	45

19	FDD	850	830 – 845	875 – 890	45
20	FDD	800	791 – 821	-41	5, 10, 15, 20
21	FDD	1500	1495.9 – 1510.9	48	5, 10, 15
22	FDD	3500	100	5, 10, 15, 20	
23	FDD	2000	2180 – 2200	180	1.4, 3, 5, 10, 15, 20
24	FDD	1600	1525 – 1559	-101.5	5, 10
25	FDD	1900	1930 – 1995	80	1.4, 3, 5, 10, 15, 20
26	FDD	850	859 – 894	45	1.4, 3, 5, 10, 15
27	FDD	850	852 – 869	45	1.4, 3, 5, 10
28	FDD	700	758 – 803	55	3, 5, 10, 15, 20
29	FDD / CA	700	717 – 728	N/A	3, 5, 10
30	FDD	2300	2350 – 2360	45	5, 10
31	FDD	450	10	1.4, 3, 5	
32	FDD / CA	1500	N/A	1452 – 1496	5, 10, 15, 20
33	TDD	2100	1900 – 1920		N/A
34	TDD	2100		N/A	5, 10, 15
35	TDD	1900		N/A	1.4, 3, 5, 10, 15, 20
36	TDD	1900		N/A	1.4, 3, 5, 10, 15, 20
37	TDD	1900		N/A	5, 10, 15, 20
38	TDD	2600	2570 – 2620		N/A
39	TDD	1900		N/A	5, 10, 15, 20
40	TDD	2300	N/A	N/A	5, 10, 15, 20

Elaborada por: Autor

Existen algunas limitaciones en cuanto a los requerimientos de radio frecuencia asociados a una banda en particular. En resumen, dichas restricciones se ven motivadas por:

- La coexistencia de operadores móviles funcionando en zonas geográficas comunes. Debido a esto se pueden desplegar diferentes interfaces radio por parte de los operadores, y por lo tanto el estándar LTE debe definir ciertas exigencias que garanticen su coexistencia con otras tecnologías de acceso radio.

- La operatividad y compartimiento de LTE con otros servicios o sistemas inalámbricos desplegados sobretodo que afecten las bandas adyacentes o en fronteras políticas del país, donde el marco regulador del espectro radioeléctrico local varía en cada nación.
- Es notable el hecho de que LTE sea un sistema diseñado a largo plazo o abierto desde la perspectiva de bandas de frecuencia de operación, de tal manera que, nuevas versiones del estándar adicionan nuevas bandas en el espectro radioeléctrico.
- Los UE se deben diseñar asumiendo que podrían funcionar en un amplio margen de frecuencias. Estas imposiciones se suelen especificar en términos de la máxima potencia permitida, las emisiones espúreas y emisiones fuera de banda, entre otras. (Agusti et al., 2010)

CAPÍTULO 3. ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DEL SISTEMA RADIANTE LTE APT 700

3.1 Generalidades APT700

El espectro se considera un activo clave para el desarrollo de la banda ancha móvil y la internet de las cosas (IoT). Las bandas de alta y baja frecuencia desempeñan un papel clave para impulsar la adopción de LTE en todo el mundo. En 2012, 3GPP ha incluido con éxito la banda APT700 (banda 28) según APT (Telecomunitario Asia-Pacífico, una organización intergubernamental entre los países de APAC para tratar las políticas de espectro) y los acuerdos oficiales de la UIT en 2010/11. (Ming, Yun, Coelho, 2016)

El siguiente mapa mundial resume la decisión de usar APT700 MHz y la banda US700 (USA 700 Upper C, elegida por operador Verizon Wireless USA).

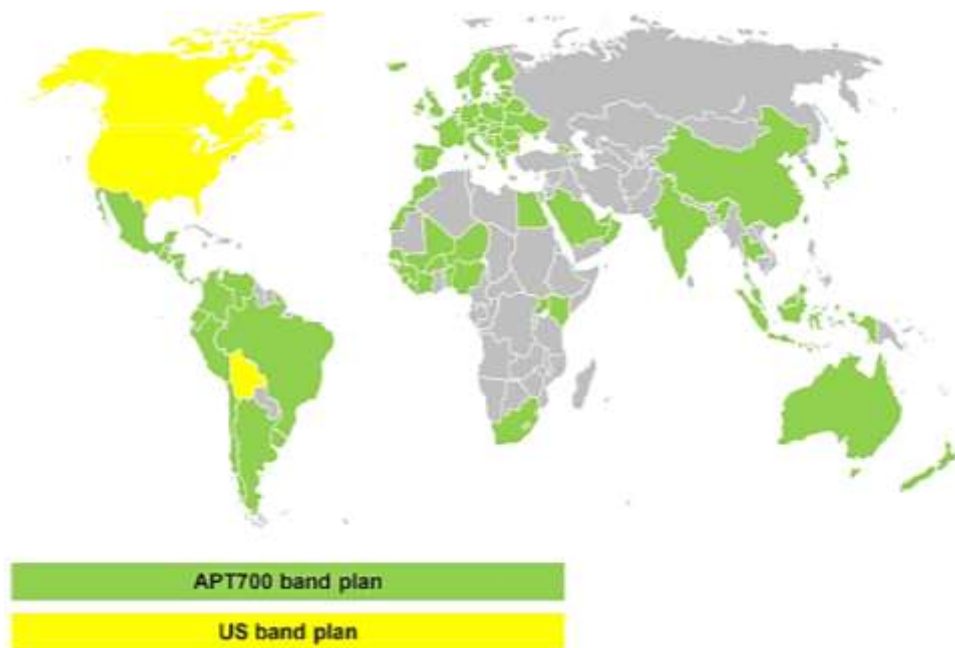


Figura 3.1: Adopción de APT700 versus US700 (estatus 2016)
Fuente: (Ming et al., 2016)

El despliegue de APT700 es altamente recomendado para brindar una experiencia de banda ancha en áreas rurales/suburbanas y proporcionar una penetración excepcional en construcciones para una cobertura interior potente. De hecho, está clasificado como una banda baja (espectro por debajo de 1 GHz). Ofrece una amplia cobertura, en comparación con las bandas altas, como 1800 MHz y 2600 MHz, lo que permite una reducción significativa en inversiones de infraestructura de telecomunicaciones.

APT 700 ya está ganando impulso para los servicios LTE, y se han iniciado implementaciones a gran escala desde 2014. Actualmente hay 26 redes LTE comerciales que utilizan la banda 28 en 14 países. Países grandes como Australia, Brasil, Japón y Filipinas ya han iniciado con éxito los servicios de LTE en el uso de la banda 28. Además, más de 10 operadores de LTE han implementado la agregación de operadores inter-bandas en el uso de la banda 28 y cientos de dispositivos LTE comerciales admiten dicha banda proporcionando un fuerte compromiso con los operadores para tener confianza en el despliegue de la misma. (Ming et al., 2016)

3.2 Espectro y Armonización de la Frecuencia

La Asia Pacific Telecommunity (APT) ha definido la banda de 700 MHz para las dos variantes LTE de duplexación: FDD (dúplex de división de frecuencia) y TDD (dúplex de división de tiempo). El 3GPP y la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) han estandarizado los planes de banda espectral para la segmentación de la banda APT que se resumen en la tabla 3.1 a continuación.

Tabla 3.1: Planes de frecuencia estandarizados de 3 GPP para una segmentación adecuada de la banda de 700 MHz.

3GPP Band	Duplex	Uplink Frequency	Downlink Frequency
28 ⁴	FDD	703 – 748 MHz	758MHz – 803MHz
44 ⁵	TDD	703 – 803MHz	703 – 803MHz

Fuente: (ZTE Corporation, 2013)

Desde su inicio, la popularidad del plan de banda APT700 ha crecido y ha sido aceptada por muchos países en Asia-Pacífico, América del Sur y Medio Oriente, como se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Países que han adoptado la segmentación APT700 MHz.

Country	Region	Adopted?	Population
Australia	Asia-Pacific / Oceania	Yes	23.0 million
Argentina	South America	Yes	40.1 million
Brazil	South America	In development	194.0 million
Chile	South America	Yes	16.6 million
China	Asia-Pacific	Yes – TDD	1,354.0 million
Colombia	South America	Yes	47.1 million
Costa Rica	South America	Yes	4.3 million
Ecuador	South America	Yes	14.7 million
Japan	Asia-Pacific	Yes	127.8 million
India	Asia-Pacific	Yes	1,210.5 million
Mexico	South America	Yes	112.3 million
New Zealand	Oceania	Yes	4.4 million
Panama	South America	Yes	3.6 million
Papua New Guinea	Asia-Pacific	Yes	7.1 million
South Korea	Asia-Pacific	Yes	49.8 million
Taiwan	Asia-Pacific	Yes	23.3 million
Tonga	Oceania	Yes	0.1 million
United Arab Emirates	Middle-East	Yes	7.9 million

Fuente: (ZTE Corporation, 2013)

Como se muestra en la tabla anterior, la cobertura de la población mundial actual provista para el plan de banda APT700 es de aproximadamente 3,24 billones de personas. Se espera que esta cobertura aumente en los próximos años. La importancia de esta adopción colectiva mundial es, sin duda, un factor positivo para impulsar las economías de escala hacia la tecnología LTE y los dispositivos de usuario final disponibles dentro del plan de la banda.

Esto inevitablemente generará menores costos unitarios en el negocio de equipos y dispositivos, al mismo tiempo que alentará a los proveedores de tecnología a proporcionar una gama más diversa de dispositivos y unidades móviles.

3.3 Análisis de Rendimiento

APT700 tiene varias ventajas inherentes entre ellas, gran adopción en el mercado, variedad de terminales LTE, candidato para roaming mundial, sistema de fácil despliegue, muy buenas cobertura con potente penetración de la pared y cobertura en interiores. Estos aspectos lo hace una banda muy atractiva para operadores móviles que buscan ofrecer servicios LTE competitivos.

Además, en varios países, la regulación se basa en la neutralidad de los usos del espectro y los servicios. Este enfoque proporciona al operador una total flexibilidad para optimizar la línea de tiempo para implementar una nueva tecnología que mejore los servicios para el usuario final. Las ventajas principales que se pueden analizar son las siguientes:

3.3.1 Menos Pérdida de Propagación

La pérdida de propagación atribuida a diferentes bandas y las distancias de cobertura espectral difieren, incluso utilizando la misma MAPL (Pérdida de ruta máxima permitida). Dadas estas diferencias, el rendimiento del enlace y el dimensionamiento de la red también varían entre diferentes bandas de espectro. Por lo tanto, las bandas de operación seleccionadas tienen un impacto significativo en la distancia de cobertura y la experiencia del cliente (especialmente en edificios).

Para construir de manera eficiente una red LTE con un costo menor, los operadores deben elegir (al menos) una banda que proporcione un radio de celda grande para la cobertura de campo y una potente capacidad de penetración en interiores/paredes. Es obvio que las bandas de frecuencias más altas (> 1 GHz) tienen una mayor pérdida de propagación y las bandas bajas, como APT700, representan una ventaja competitiva para los operadores si se utilizan para el despliegue de servicios LTE.

Un estudio realizado por Huawei Technologies CO., LTD, LTE APT700 Whitepaper, (2016) realiza ciertas comparaciones de APT 700

con otras bandas LTE. Aquí se adopta el modelo Hata, que se divide en el modelo Okumura-Hata y el modelo Cost 231-Hata, para calcular la pérdida de propagación. (Ming et al., 2016)

El modelo Okumura-Hata es adecuado para el espectro entre 150 MHz ~ 1500 MHz, mientras que el modelo Cost 231-Hata se utiliza para el espectro por encima de 1500 MHz. La pérdida de propagación entre diferentes bandas de frecuencia se ha calculado y se muestra en la figura 3.2.

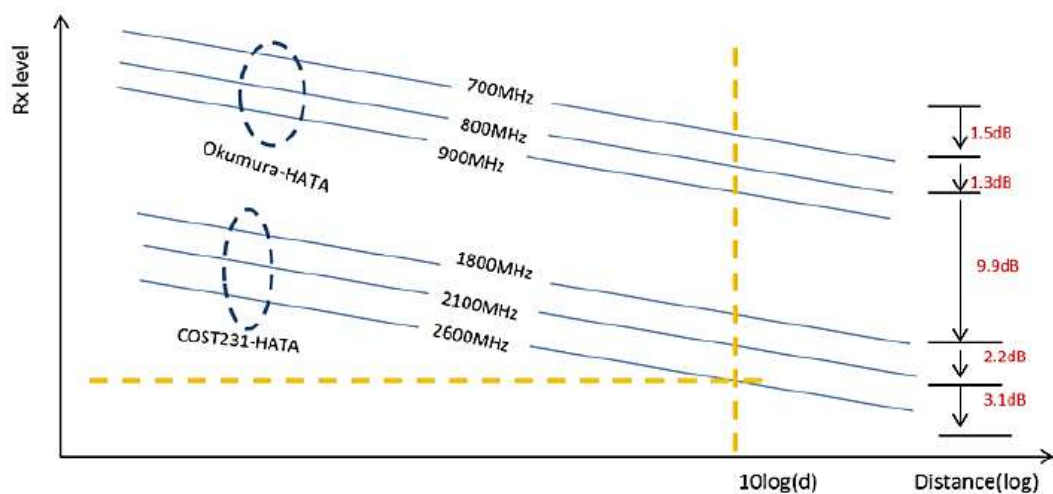


Figura 3.2: Comparación de la pérdida de propagación entre diferentes bandas. (desde APT700 hasta 2.6 GHz)

Fuente: (Ming et al., 2016)

Obviamente, para cada espectro, el nivel de Rx (recepción) disminuye conforme aumenta la distancia. Mientras tanto, la banda inferior tiene un mejor nivel de Rx que otras bandas superiores cuando tienen la misma distancia que cubrir.

Por lo tanto, 700 MHz, comparado con 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz y 2600 MHz, tiene el mejor nivel de recepción. Varios operadores han tomado totalmente en consideración este argumento al implementar LTE en áreas menos densas y suburbanas.

3.3.2 Rendimiento de Enlace y Eficiencia Espectral

El rendimiento del enlace generalmente se caracteriza por SINR con BLER garantizado. Los efectos de frecuencia en el rendimiento del

enlace se manifiestan principalmente en la disparidad de desplazamiento Doppler con una cierta velocidad de movimiento y, eventualmente, efectos en el SINR.

Sin embargo, teniendo en cuenta los escenarios típicos de despliegue de redes (por ejemplo, densos urbanos, urbanos, suburbanos, rurales, etc.), la velocidad del terminal es lenta. Los resultados muestran que en condiciones de movimiento lento, el SINR de cada banda es muy similar. La figura 3.3 muestra las condiciones de una simulación del rendimiento del enlace del modelo de canal con comparaciones entre 800 MHz, 2.3 GHz y 2.6 GHz con velocidad de movimiento de 3 Km/h. (ZTE Corporation, 2013; Ming et al., 2016)

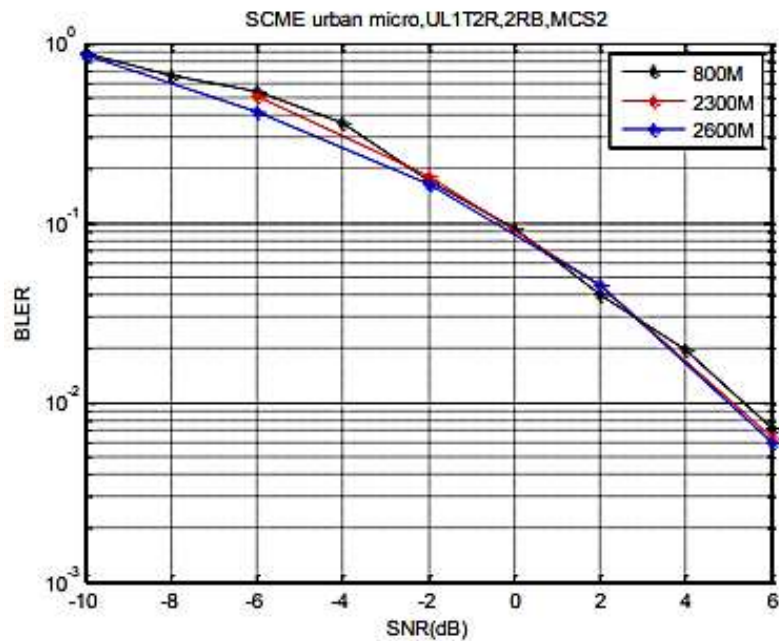


Figura 3.3: Comparación de la pérdida de propagación entre diferentes bandas. (Desde APT700 hasta 2.6 GHz)

Fuente: (ZTE Corporation, 2013)

La figura anterior muestra resultados de la simulación, y se puede decir que, el impacto del rendimiento SINR entre las bandas de frecuencia es muy limitado. Por lo tanto, al adoptar los mismos parámetros de rendimiento del enlace en la planificación de la red y el presupuesto del enlace se garantiza un comportamiento aceptable de SINR y BLER.

Es de vital importancia mencionar otro resultado de la investigación realizada por Ming et al., (2016) concerniente a la eficiencia espectral considerando las siguientes características: distancia de radio de 4 km, para la cobertura en exteriores, un mismo diseño de sitio macros y para un mismo EIRP. Ming concluye que se requiere de un menor ancho de banda para APT700 en comparación de otras bandas:

- 10 MHz para los 700 MHz,
- 20 MHz para los 1400 MHz,
- 100 MHz para los 3500 MHz.

3.3.3 Mejor Cobertura Indoor y penetración que otras bandas

Según la figura 3.4 se observa que el RSRP en edificaciones interiores está disminuyendo a medida que la distancia entre sitios aumenta de las zonas urbanas densas a las rurales. Se reconoce que cuando el RSRP < -124 dBm, solo se puede asegurar la cobertura en el exterior, y por lo tanto, los usuarios finales dentro de los edificios no pueden obtener una señal de calidad.

Como se muestra en la figura 3.4, cuando la distancia entre sitios es de 600 metros, el RSRP indoor de 2600 MHz es inferior a -124 dBm, lo que significa que el sitio desplegado a 2600 MHz solo proporciona cobertura exterior ya que la señal interior es demasiado pobre. Bajo las mismas condiciones, los sitios implementados en 700 MHz pueden proporcionar una señal suficientemente buena para los usuarios finales tanto en el exterior como en el interior. APT700 tiene la mejor capacidad de penetración en interiores entre todas las bandas que se utilizan para servicios LTE a partir de hoy. (Ming et al., 2016)

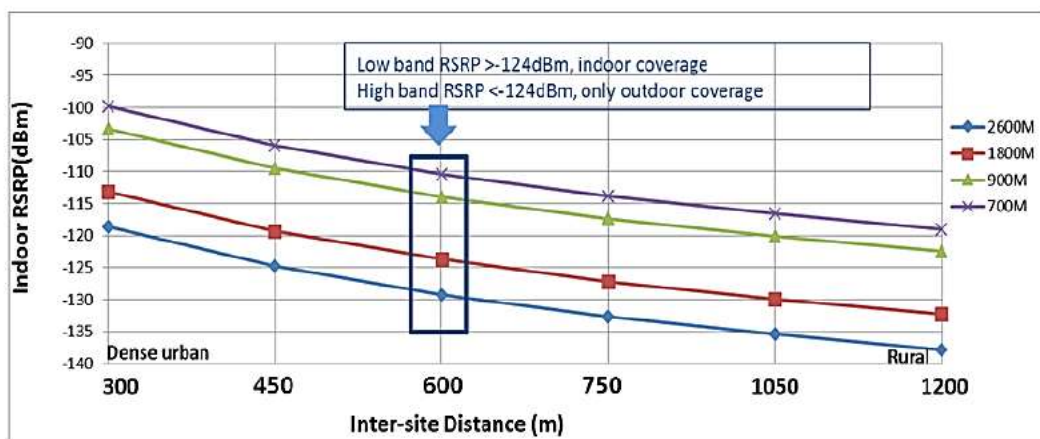


Figura 3.4: Comparación RSRP dentro de edificaciones entre varias bandas.

Fuente: (Ming et al., 2016)

3.3.4 Radio celular más grande que otras bandas

Al observar la figura 3.4, es posible realizar una comparación del radio de cobertura de una celda que utiliza 700 MHz, 900 MHz, 1.8 GHz y 2.6 GHz, según los parámetros y configuración típicos del presupuesto de enlace. Es notorio que un área de cobertura de un solo sitio que utiliza la banda APT700 es casi 3 veces más grande que 2.6 GHz y dos veces más que 1.8 GHz.

Por lo tanto, las bandas de frecuencias más bajas, como APT700, brindan un beneficio de cobertura significativo a los operadores. En otras palabras, para cubrir la misma área, el número de sitios LTE desplegados con 2.6 GHz es 3 veces más que los necesarios si se usan 700 MHz (asumiendo el mismo ancho de banda de espectro para cada banda).

Si los operadores utilizan varias bandas para su despliegue de red LTE, no hay duda de que APT700 representa una opción competitiva para la cobertura nacional para reducir el número de sitios, ahorrar los costos de despliegue de red y acelerar el progreso del despliegue.

3.3.5 Beneficios para el usuario final en el uso de APT700

Como se mencionó en apartados anteriores, la banda 700 MHz proporciona una mejor cobertura y una mejor penetración en

interiores/paredes. Desde el punto de vista de los usuarios finales, la red LTE implementada en APT700 puede proporcionarles una mejor experiencia de banda ancha móvil. Con sitios macros, los suscriptores pueden obtener servicios de datos de calidad en cualquier lugar, sin importar que estén dentro o fuera del edificio, y sin importar que estén en el centro de la ciudad o en un área rural remota. Es posible mencionar las siguientes ventajas para los usuarios:

En primer lugar, debido a sus capacidades de propagación, puede ofrecer una cobertura uniforme de la celda en cualquier ubicación para servicios VoLTE altamente sensibles. APT700 puede cumplir con todos los requisitos de cobertura obligatorios y ofrecer a los operadores una opción competitiva para brindar la mejor experiencia VoLTE a sus suscriptores.

En segundo lugar, APT700 ofrece prestaciones llamativas para los nuevos servicios que involucran la tecnología Narrowband-iot (NB-IoT) en las distintas tecnologías que compiten en el mercado denominadas LPWAN (Low-Power WideArea Networking). Dicha tecnología se lanzará comercialmente en nodos celulares. El uso de bandas bajas (< 1 GHz) debe ser un objetivo principal para los operadores cuando ofrecen soluciones NB-IoT y APT700 es una banda candidata obvia.

Como tercera ventaja, APT700 es totalmente capaz de agregarse con otras bandas LTE para admitir el rendimiento de agregación de operador (CA) LTE-Advanced. 3GPP ya ha aprobado varios escenarios de CA al utilizar la banda 28 y existen referencias comerciales en funcionamiento en los últimos años.

En cuarto lugar, con el progreso de la migración global de transmisión de televisión terrestre de analógico a digital, la popularidad del plan de banda APT 700 ha crecido y ha sido aceptada por muchos países de las regiones de Asia-Pacífico, Sudamérica y Medio Oriente e incluso recientemente en Europa y África. Como resultado, la adopción global de la banda APT700 puede admitir fácilmente el roaming internacional para dispositivos LTE, lo que permite a los usuarios finales

conectar su red preferida en todo el mundo. (ZTE Corporation, 2013; Ming et al., 2016)

3.3.6 Gran economía de escala para APT700

Debido a la fuerte adopción de dispositivos móviles que incluyen teléfonos inteligentes, tabletas y computadoras portátiles, el tráfico de datos móviles continúa creciendo rápidamente. Se espera un aumento de 12 veces en 2018, impulsado principalmente por las demandas de video.

Sin lugar a dudas, solo LTE puede satisfacer estas demandas de datos cada vez más dramáticas. Según GSA, actualmente 521 redes LTE se lanzan comercialmente a nivel mundial, y este número continuará en aumento. En 2016 hubo 1.45 mil millones de suscripciones a LTE. Además, en octubre de 2016, estaban disponibles 6.504 dispositivos comerciales de LTE (Informe GSA "Estado del ecosistema de LTE", 10-10-2016). Incluye todas las bandas de frecuencia y las variantes de ancho de banda de las portadoras, impulsadas por unos 502 proveedores de terminales, según las estadísticas de GSA. Entre ese número total de terminales LTE, aproximadamente 500 de ellos son compatibles con la banda 28 de APT700.

Con países grandes como Australia, Brasil, Japón o México y ahora Europa trabajando en la banda APT700 para servicios comerciales de LTE, se espera que la cantidad de terminales LTE que soportan esta banda aumente considerablemente en los próximos años.

3.4 Comparación de cobertura de diferentes bandas de frecuencia

Con los parámetros y la configuración del presupuesto del enlace la investigación presentada por ZTE Corporation (2013) muestra en la tabla 3.3 una comparación basada en la tasa de borde de enlace ascendente de entornos urbanos densos a entornos rurales y el radio de cobertura de un solo sitio que utiliza 700 MHz, 800 MHz, 1.8 GHz, 1.9 GHz, 2.1 GHz y 2.6 GHz.

Tabla 3.3: Comparación de cobertura de enlace ascendente de escenarios típicos.

Morph		Dense Urban	Urban	Suburban	Rural
Cell Edge User Throughput	kbps	512	256	128	64
700MHz					
UL Cell Range	km	0.70	1.21	3.37	8.48
Coverage Area	Km2	0.95	2.84	22.16	140.37
800MHz					
UL Cell Range	km	0.63	1.09	3.04	7.65
Coverage Area	Km2	0.78	2.33	18.06	114.22
1.8GHz					
UL Cell Range	km	0.38	0.64	1.67	4.40
Coverage Area	Km2	0.27	0.80	5.42	37.71
1.9GHz					
UL Cell Range	km	0.36	0.61	1.58	4.17
Coverage Area	Km2	0.25	0.72	4.87	33.84
2.1GHz					
UL Cell Range	km	0.32	0.55	1.43	3.77
Coverage Area	Km2	0.21	0.60	4.00	27.69
2.3GHz					
UL Cell Range	km	0.30	0.51	1.31	3.44
Coverage Area	Km2	0.17	0.50	3.35	23.08
2.6GHz					
UL Cell Range	km	0.27	0.45	1.16	3.04
Coverage Area	Km2	0.14	0.40	2.63	18.06

Fuente: (ZTE Corporation, 2013)

De los resultados, un área de cobertura de un solo sitio que utiliza la banda de 700 MHz en varios escenarios es el equivalente de 7 a 8 veces la de la banda de 2.6 GHz. En otras palabras, para cubrir la misma área, el número de sitios utilizados para 2.6GHz será de 7 a 8 veces lo que se usa para 700 MHz.

Si el operador utilizará varias bandas para la implementación de la red, no hay duda de que 700 MHz es la mejor opción para la cobertura territorial para ahorrar costos de implementación de la red y acelerar la misma. La GSA reafirmó su opinión de que la LTE es la tecnología de sistemas móviles con el desarrollo más rápido. Esta visión puede ser cuantificada por los compromisos tecnológicos realizados estratégicamente por los operadores móviles en todo el mundo. Estas

redes LTE comerciales de temprana adopción se basan principalmente en el espectro de 1800 MHz, y si un operador hiciera una comparación económica con una cobertura de red contigua equivalente provista en el espectro de 700 MHz, el costo de despliegue de 1800 MHz será un factor de dos más alto que APT700.

Como regla general, las redes de acceso que operan en frecuencias más bajas, como 700 MHz, proporcionan una mejor penetración celular (es decir, recepción en el edificio) y cobertura con menos nodos celulares desplegados. Verizon Wireless (EE.UU.) ha declarado que, a partir del análisis operacional de su sistema ", su red 4G LTE, que opera en la banda de 700 MHz, es cinco veces más eficiente que su red 3G".

A pesar de los beneficios inherentes de la banda de 700 MHz para la tecnología LTE, la necesidad de otros espectros LTE emparejados, como 1800 MHz, 2600 MHz, 2100 MHz o 900 MHz, todavía es necesaria. La asignación de espectro fragmentado disponible en todo el mundo para el uso del operador móvil ha evolucionado de tal manera que requiere la armonización y asignación de frecuencias para ofrecer experiencias de clientes móviles sin problemas. (ZTE Corporation, 2013)

3.5 Especificación Técnica de Parámetros Físicos y de Radiación

El sistema radiante APT700 propuesto considera las siguientes características y parámetros físicos que permiten el óptimo rendimiento para alcanzar los objetivos propuestos:

Tabla 3.4: Configuración de parámetros físicos para el sistema LTE APT700.

Parámetro	Asignación
Altura de antena	42 mts.
Tilt Eléctrico	4°
Tilt Mecánico	0°
Orientación (Azimut)	270° / Norte
Patrón de radiación	Dado por el fabricante Fig. 3.5
Potencia configurada	40 Watios
Ganancia de antena	16 dBi

Banda de Frecuencia de Operación	Banda 28 (APT700)
Ancho de Banda	15 MHz
Polarización Antena	$\pm 45^\circ$

Fuente: Autor

Para sistemas considerados de banda baja, la altura de 42 metros es ideal para cubrir zonas suburbanas y rurales. De acuerdo a la configuración se proyecta un valor de cero grados de inclinación mecánica para la antena, permitiendo así, que la instalación contribuya con la cobertura de radiación del sistema. Una excesiva inclinación mecánica podría degradar los niveles de recepción en el UE y ocasionar los denominados huecos o sombras de cobertura.

Como se vio en el apartado 2.3.3 el patrón de radiación de una antena representa gráficamente el comportamiento y distribución de la energía en función del ángulo. El sistema LTE implementado se propaga de acuerdo al patrón dado por el fabricante de la antena como se observa en la figura 3.5.

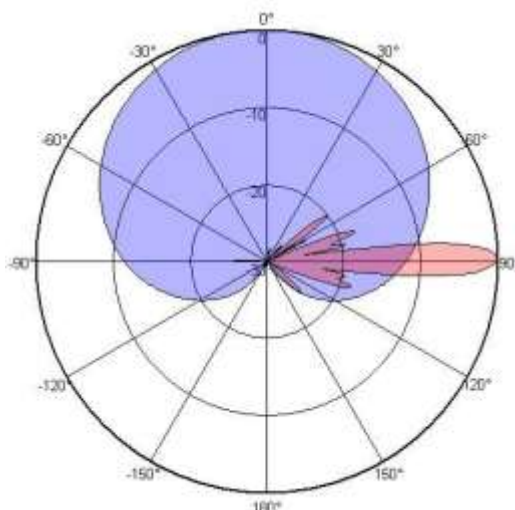


Figura 3.5: Ilustración del patrón de radiación para una antena de bajas frecuencias.

Fuente: (TONGYU COMMUNICATION, 2015)

El esquema muestra la conformación del lóbulo principal de la antena donde se produce la ganancia máxima y desde una perspectiva vertical. El patrón de radiación horizontal muestra la distribución de la

energía en forma de un cardiode. De acuerdo a los parámetros establecidos dicho patrón dispone su orientación hacia los 270 grados medidos desde el Norte Cardinal.

Se consideran otros valores estandarizados para este tipo de sistemas LTE como son la potencia de entrada de 40 W, el ancho de banda de operación de 15 MHz, la cross-polarización y ganancia isotrópica de la antena provistos por el fabricante.

CAPITULO 4. MEDICIONES, RESULTADOS Y ANÁLISIS

La recolección de datos es un proceso vital dentro de la investigación científica el cual requiere de mecanismos que brinden precisión en la información, confianza y eficiencia. Por esta razón, para lograr el cumplimiento de los objetivos es pertinente el uso de herramientas y prestaciones externas de ingeniería para radio frecuencia.

En tal virtud, en primera instancia se describen las características que Accuver ofrece a través de su software de procesamiento y recolección de datos en la interfaz aire. Posteriormente, se describirá en detalle un análisis individual y comparativo de los niveles de recepción en bandas LTE AWS versus APT700 y finalmente se analizará el rendimiento de la interfaz aire y parámetros de calidad asociados.

4.1 Recolección de Mediciones: XCAL

XCAL es el software utilizado para obtener el comportamiento de la interfaz aire. Provee un conjunto de herramientas virtuales flexibles, que se utiliza ampliamente en muchas de las redes inalámbricas desplegadas en el mundo.

Está diseñada para solucionar problemas, monitorear, mantener y optimizar el rendimiento de la red inalámbrica de voz y datos, todo en tiempo real. XCAL evalúa calidad del servicio (QoS) y garantiza una integración perfecta del servicio con redes móviles como GSM, WCDMA, HSPA, LTE y NB-IoT. (Accuver, 2018)

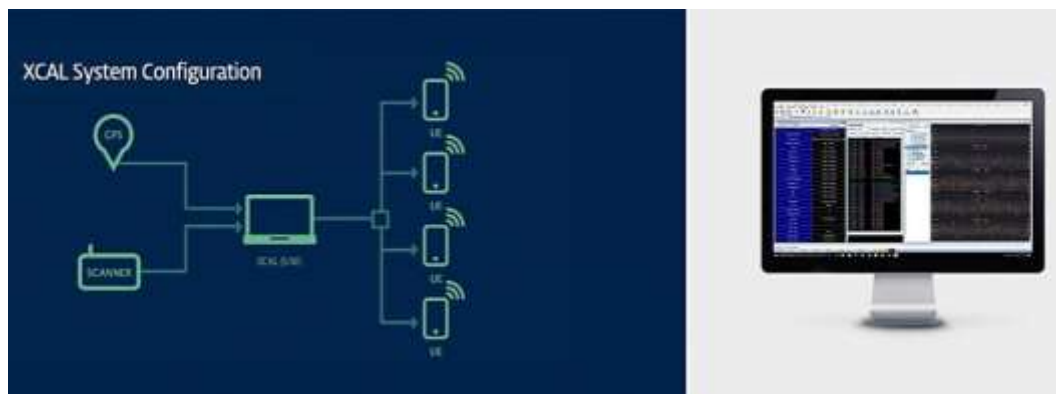


Figura 4.1: Esquema de configuración física del sistema XCAL.

Fuente: (Accuver, 2018)

El esquema de conexiones se muestra en la figura 4.1, considerando un total de hasta 4 terminales en paralelo, un dispositivo GPS, un escáner y una computadora personal que procese toda la información obtenida en tiempo real.

Al grabar y descifrar automáticamente los mensajes de la interfaz aire, XCAL detecta cualquier cuello de botella e impedimentos para brindar servicios de voz y datos de alta calidad. Muy recomendado para mediciones y análisis 4G VoLTE.

4.1.1 Características XCAL

Los aspectos más significativos son los siguientes:

Recolección de diversos datos: Es capaz de recopilar mensajes de capas 1, 2, 3, información de paquetes TCP/IP mediante el interfuncionamiento con el dispositivo y el escáner.

Compatible varios chipsets de terminales, fabricantes como: Qualcomm, LGE, Samsung, Altair, Sequans, Intel, GCT, Nokia, etc.

Soporta varias tecnologías inalámbricas, entre las más actuales; WiBro, WiMAX, WiFi, GSM/GPRS, WCDMA, HSDPA, HSUPA, HSPA+, LTE, LTE-A y NB-IoT.

Permite la ejecución de varias pruebas de automatización de aplicaciones: Voz, SMS, MMS, FTP, Ping, UDP, correo electrónico,

VoLTE, YouTube, Google Play, prueba de automatización de la aplicación Android. Mensajería y mensajes de texto.

Funcionalidad con varios scanners: DTI (PCTel), DRT, RnS, Anritsu, Venture.

4.2 Procesamiento de Mediciones: XCAP

XCAP es una plataforma de análisis potente y altamente configurable la cual permite extraer y analizar datos recopilados en XCAL. Disponible tanto como una plataforma independiente como una solución cliente-servidor de nivel empresarial, admite todos los estándares inalámbricos y los principales formatos de datos. (Figura 4.2)



Figura 4.2: Ilustración de funcionalidades de XCAP.

Fuente: (Accuver, 2018)

XCAP minimiza gastos operativos al automatizar todo el flujo de trabajo de post-procesamiento y solución de problemas de la red. Debido a que está enfocado a ingeniería de radio frecuencia, viene cargado con una lista completa de KPIs específicos del estándar.

4.2.1 Ventajas de XCAP

XCAP ofrece un entorno versátil y amigable al usuario y lo más importante, evoluciona continuamente mediante actualizaciones de estándares y funciones. Sus ventajas son:

- Solución rápida de problemas y análisis de causa raíz de redes inalámbricas. Incluyendo grandes volúmenes de datos de prueba de terminales.
- Proporciona informes detallados sobre el rendimiento de la red global y específico del servicio.
- Permite crear, modificar y gestionar informes de indicadores de rendimiento.
- Analizar comportamientos de la red y realizar análisis estadísticos complejos. (Accuver, 2018)

4.3 Análisis de Mediciones del Sistema Radiante APT700

El trabajo de investigación presenta dos escenarios considerando una misma orientación de celda y la misma zona suburbana: celda de radiación con cobertura LTE AWS (SR_BAND_AWS); y celda radiación con cobertura APT700 (SR_BAND_28). De esta manera, se pueden contrastar los resultados reales, de una forma objetiva y práctica mediante gráficas de señales, plots y estadísticas. En las figuras 4.3 y 4.4 se puede observar el mapeo de la zona recorrida para cada banda de frecuencia censada.



Figura 4.3: Plot de recorrido total realizado.

Fuente: XCAP Log Analysis & Reporting, Accuver

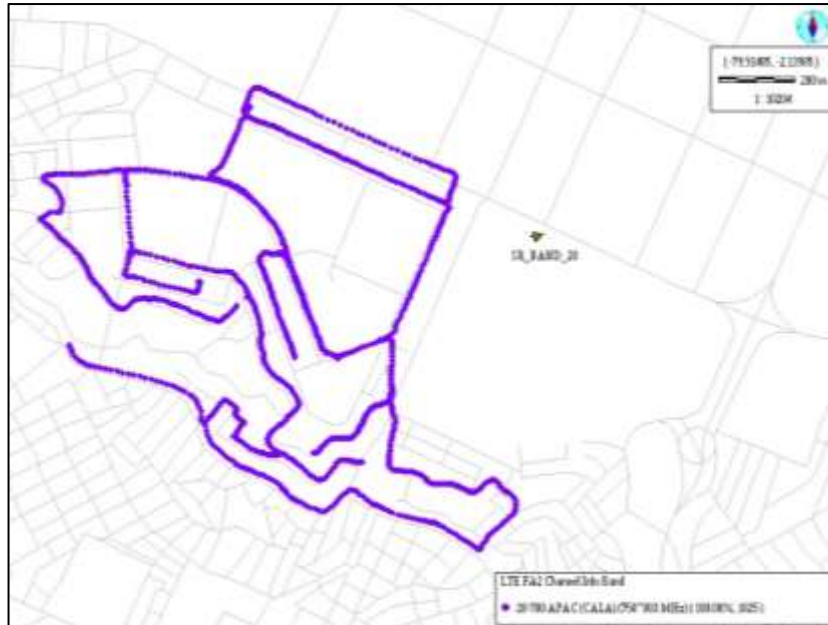


Figura 4.4: Plot de recorrido total realizado en la banda APT700.

Fuente: XCAP Log Analysis & Reporting, Accuver

Las figuras anteriores muestran la distribución de datos recolectados, la ubicación de los sistemas radiantes SR_BAND_AWS y SR_BAND_28. Además el mapeo y los puntos graficados denotan la trayectoria recorrida durante el proceso de pruebas y recolección de información de los parámetros a analizar posteriormente.

Es importante mencionar que el recorrido efectuado y su conformación (del clúster), están en función de las condiciones reales presentes en el área suburbana, es decir, se consideraron obstáculos y caminos inaccesibles propios de la zona.

4.4 Desempeño de Cobertura en Bandas AWS / APT700

Como se describió en el apartado 2.7.5, el RSRP es el parámetro inherente en la interfaz aire, el cual permite conocer la intensidad de señal de la celda servidora en el enlace descendente. Es la medición de vital importancia en la capa física considerada también durante la planificación y despliegue de sistemas LTE.

Los niveles de RSRP para la señal utilizable varían generalmente en el rango de -65 dBm (UE cerca de un eNodeB) hasta -120 dBm

considerado en borde de cobertura LTE. Los valores de RSRP y criterios de aceptación se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.1: Categorización de valores de RSRP.

Niveles de RSRP		
Criterio	Rango (dBm)	Comportamiento
Excelente	$x \geq -65$	Las condiciones de radiofrecuencia y niveles de intensidad permiten que los servicios de voz y datos no se vean afectados. Altas tasas de throughput.
Bueno	$-75 \leq x < -65$	
Aceptable	$-85 \leq x < -75$	
Regular	$-90 \leq x < -85$	Podrían surgir intermitencias y latencias en servicios de PS y CSFB. Degradación de calidad.
Inestable	$-95 \leq x < -90$	
Malo	$-105 \leq x < -95$	El UE se ve forzado a consumir más potencia para establecer los servicios. Presencia de interferencia.
Insuficiente	$x < -105$	No existe garantía en establecer una sesión de datos.

Fuente: El Autor

Es notorio observar el rango de valores de RSRP inferiores a -85 dBm garantizan un comportamiento óptimo y confiable, es decir, el UE (o varios dispositivos presentes en la red) estará con las condiciones de RSRP favorables (mediante reportes en la señalización) para la asignación de recursos de red y establecimiento de contextos radio Bearer para las prestaciones de servicios que demanden ciertos criterios de RSRP.

Por otra parte, se consideran valores con degradación aquellos que incrementan la probabilidad de eventos desfavorables, tales como robotización en las llamadas de voz, discontinuidad en los servicios de PS, bajas tasas de transmisión para canales de DL/UL, incremento en la potencia de transmisión del UE, entre otros.

4.4.1 Comportamiento RSRP para LTE AWS

Los valores de RSRP que se muestran en la figura 4.5 pueden ser analizados de una manera más objetiva al identificar los colores y su dispersión en áreas de interés. Una vez realizado el recorrido se obtuvo el siguiente comportamiento de mediciones RSRP:

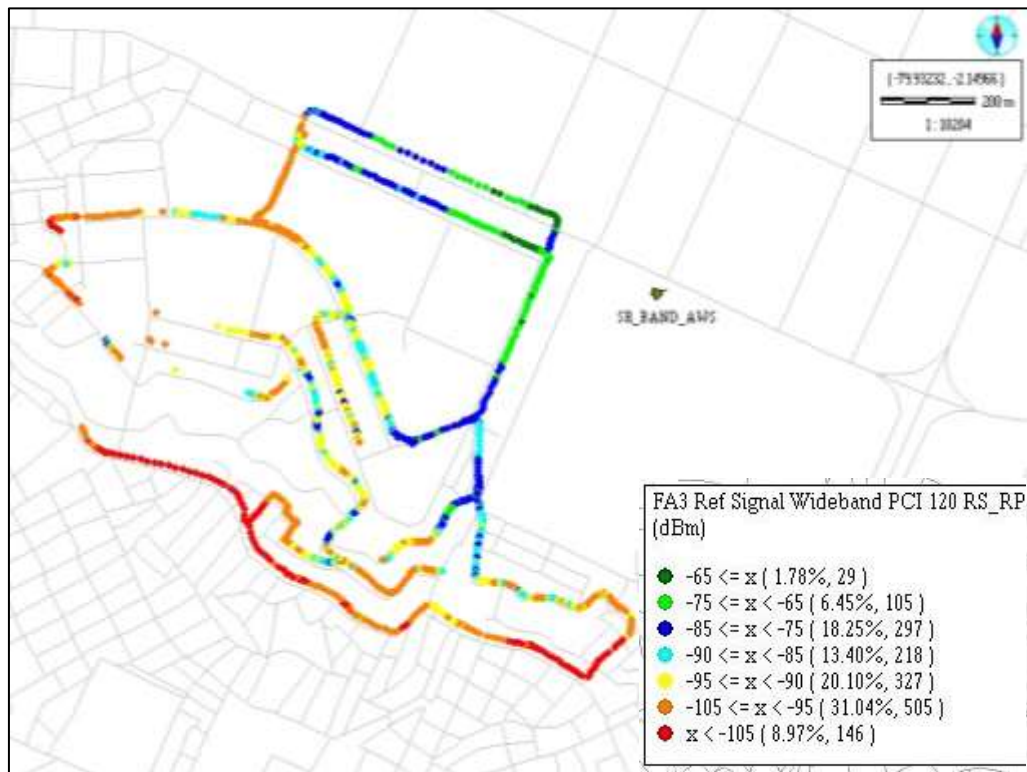


Figura 4.5: Distribución de niveles RSRP para LTE AWS en zonas suburbanas.

Fuente: XCAP Log Analysis & Reporting, Accuver

De acuerdo a la figura 4.5 es notorio distinguir que la distribución de muestras menores a -90 dBm abarca gran parte del recorrido. A simple vista, se puede asegurar que existe degradación crítica de los niveles de RSRP para más del 30% del total de muestras. Existen menos del 10% de mediciones con niveles excelentes por encima de -75 dBm. El comportamiento de la cobertura LTE AWS en la zona, no garantiza las prestaciones de servicios en su totalidad y deja apertura para una gran posibilidad de degradación en la calidad del servicio y transmisión de datos en un 60.11% (RSRP < -95 dBm).

Un análisis estadístico descriptivo permite visualizar y sustentar lo expuesto anteriormente. En la siguiente figura se grafican los resultados de la función de densidad de probabilidades y sus valores acumulados:

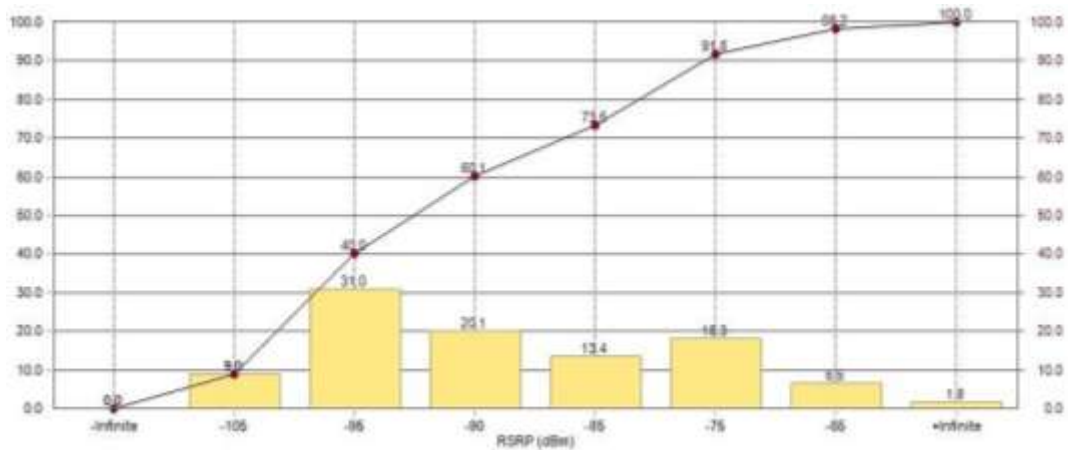


Figura 4.6: Gráficas de la PDF y CDF de niveles RSRP para la banda LTE AWS.

Fuente: XCAP Log Analysis & Reporting, Accuver

Efectivamente, el comportamiento de los resultados revela una distribución de muestras en el rango $-105 \text{ dBm} \leq x < -95 \text{ dBm}$ con un 30% y en el intervalo de $-95 \text{ dBm} \leq x < -90 \text{ dBm}$ correspondiente al 20.1% del total de información, siendo éstas, las de mayor concentración de mediciones RSRP durante el recorrido. Para los valores óptimos de RSRP se tienen dos aglomeraciones adicionales de porcentajes de 18.3% y 13.4% para intervalos menores a -75 dBm y -85 dBm respectivamente.

Sin embargo, al analizar la CDF, la realidad de la deficiencia de cobertura en la zona se hace más notoria. Es posible afirmar que el 60.1% del total de muestras fueron obtenidas para valores menores a -90 dBm y tan solo un 8.2% agrupa mediciones de RSRP excelentes por encima de -75 dBm . Asimismo, se registran niveles de intensidad por debajo de -105 dBm , incrementando la posibilidad de eventos adversos durante las prestaciones de servicios móviles.

4.4.2 Comportamiento de RSRP para LTE APT700

Los resultados de las mediciones RSRP sobre la banda en los 700 MHz se observan en la figura 4.7. Un vistazo general permite identificar

rápidamente la zona donde existen excelentes niveles de cobertura. Las muestras de color anaranjado y amarillo indican niveles de intensidad por debajo de -90 dBm con tan solo un 25% del total de muestras recolectadas.

Es evidente que, hay intervalos donde existen óptimas condiciones de cobertura acumulando porcentajes mayores a un 15% y un máximo de hasta 43.01% muestras RSRP en el rango de $-85 \text{ dBm} \leq x < -75 \text{ dBm}$.

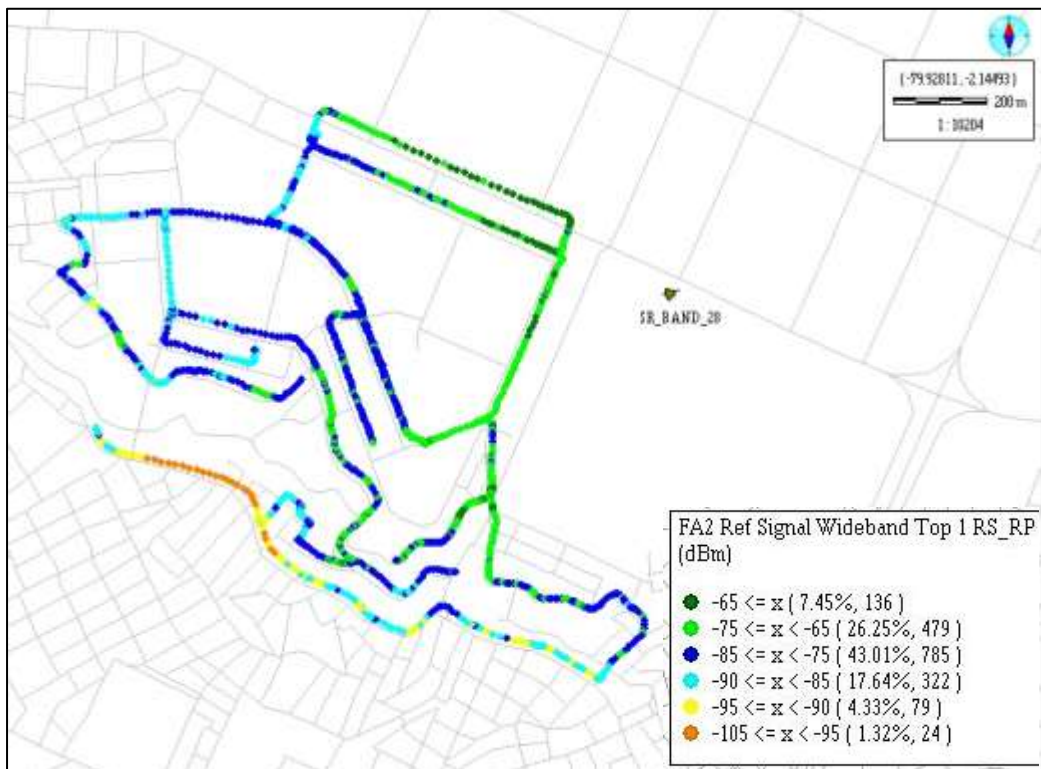


Figura 4.7: Distribución de niveles RSRP para LTE APT700 en zonas suburbanas.

Fuente: XCAP Log Analysis & Reporting, Accuver

Si bien es cierto, el análisis de plots de la figura 4.7 permite visualizar el rendimiento óptimo de la cobertura LTE APT700. No obstante, los gráficos de la PDF y CDF en la figura 4.8 muestran datos convincentes y refuerzan lo expuesto anteriormente. Las mediciones RSRP representan una PDF con aproximación a una distribución Normal con un valor medio en el rango de $-85 \text{ dBm} \leq x < -75 \text{ dBm}$ y desviación estándar aproximada de 8 dBm.

Por tal razón, la mayor concentración de valores RSRP se encuentran en dicho intervalo, siendo equivalentes a un 43% del total de la cobertura. Ciertamente, la distribución indica también una suma del 86.8% de datos menores a -65 dBm y mayores a -85 dBm, es decir, las condiciones de radiofrecuencia y sus niveles de intensidad son óptimos para las prestaciones de la red durante el mayor tiempo del recorrido realizado, garantizando los servicios móviles en el UE.

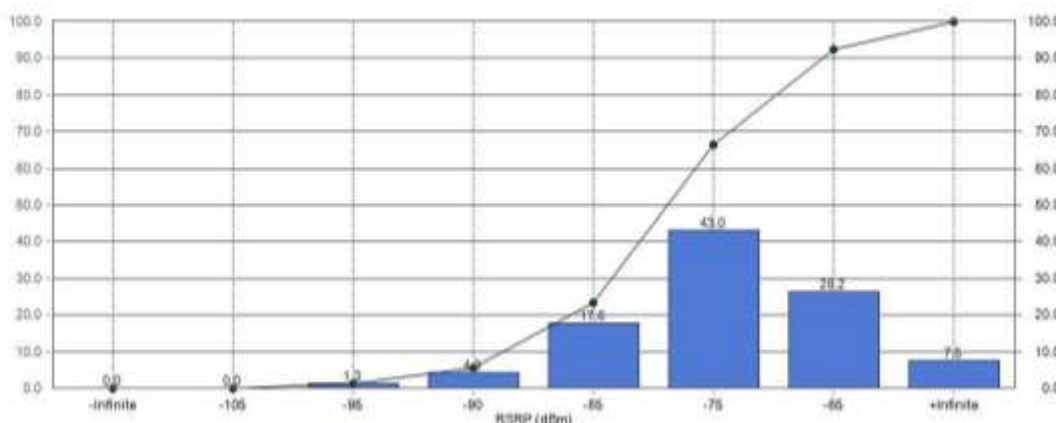


Figura 4.8: Gráficas de la PDF y CDF de niveles RSRP para la banda LTE APT700.

Fuente: XCAP Log Analysis & Reporting, Accuver

Es necesario resaltar que la degradación de cobertura es minúscula. Solamente un 5.65% de datos registran degradación en la cobertura con valores entre $-105 \text{ dBm} \leq x < -90 \text{ dBm}$ y además, con lejanía respecto al sistema radiante. No existen muestras inferiores a -105 dBm lo cual garantiza e incrementa la posibilidad de servicios móviles con alto rendimiento, sobre todo en los canales físicos de DL/UL sensibles al ruido e interferencia.

4.4.3 Análisis Comparativo RSRP

El resultado de señales de cobertura de ambas bandas se observa en la figura 4.9. Gráficamente (y en función del tiempo) se diagrama el comportamiento de las dos señales de referencia censadas. La señal resultante superior corresponde a los niveles RSRP para LTE AWS, mientras que, la inferior representa la señal RSRP en la banda APT700.

Dichos niveles vienen dados en dB referenciados a 1 mW. Además se consideran las estadísticas dadas en la tabla 4.2.

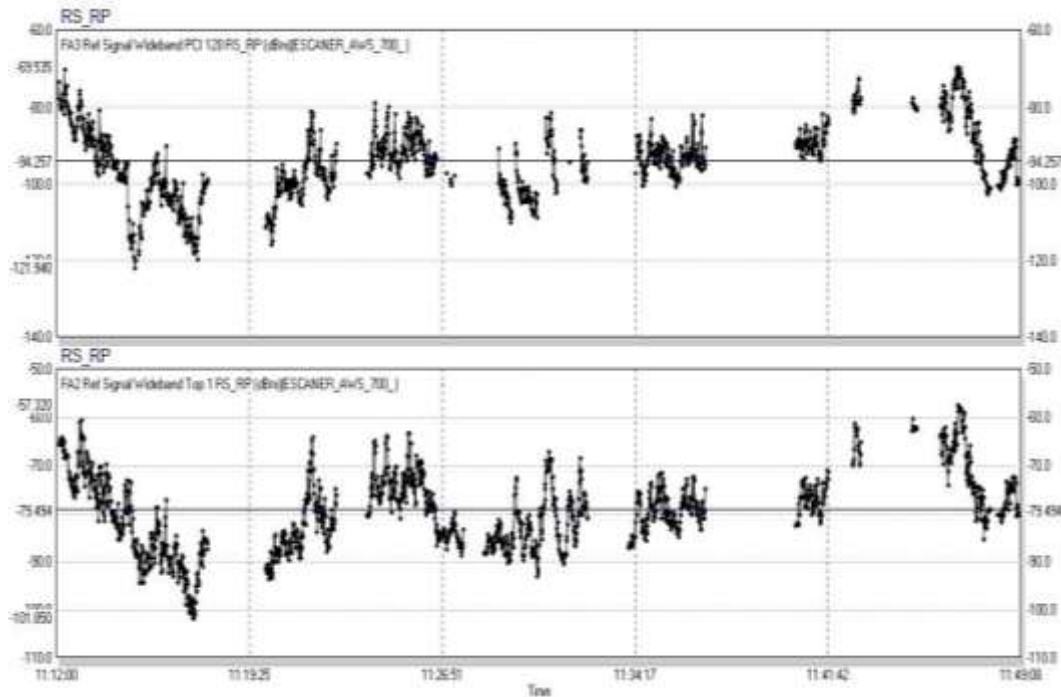


Figura 4.9: Niveles RSRP obtenidos durante el recorrido. Superior: LTE AWS; Inferior: LTE APT700.

Fuente: XCAP Log Analysis & Reporting, Accuver

De acuerdo a los valores mostrados en la figura 4.9 y tabla 4.2 es evidente la diferencia que existe en los promedios comparativos RSRP. La cobertura AWS registra un valor medio de -94.26 dBm y una desviación estándar de 11.07 dB. En cuanto a la media de APT700, se observa en mejores condiciones con -79.49 dBm de recepción. A diferencia de AWS, la dispersión en APT 700 es superior con hasta 2 dB.

Tabla 4.2: Valores Cuantitativos Estadísticos RSRP.

Descripción	RSRP / AWS	RSRP / APT700
Mínimo	-121.94	-101.85
Máximo	-57.15	-57.13
Promedio	-94.26	-79.49
Desv. Estándar	11.07	8.25
Mediana	-92.61	-78.77

Fuente: El Autor

Observando los valores mínimos de recepción es notable identificar que la banda APT700 tiene un mejor rendimiento en comparación con AWS. Mientras que la banda 28 posee un mínimo de -101.85, AWS se encuentra 20 dB por debajo. Otra estadística que apoya lo antes mencionado es el valor de la mediana siendo de -78.77 dBm en APT700, lo que implica una mayor frecuencia de recepción en el UE.

Las observaciones se relacionan también con el análisis de mediciones RSRP para usuarios indoor (que se encuentran dentro de edificaciones). De acuerdo a la figura 4.7 es posible proyectar la recepción indoor considerando -10 dB de pérdida para usuarios que se encuentren en el interior de edificaciones y afirmar que la experiencia de usuario será favorable para el escenario con cobertura en los 700 MHz.

A causa de la naturaleza inherente de la banda AWS es necesario recalcar la eficiencia de propagación descartando muestras menores a -90 dBm (para el análisis respectivo) y considerando un radio de distancia aproximado como se muestra en las figuras 4.10 y 4.11.

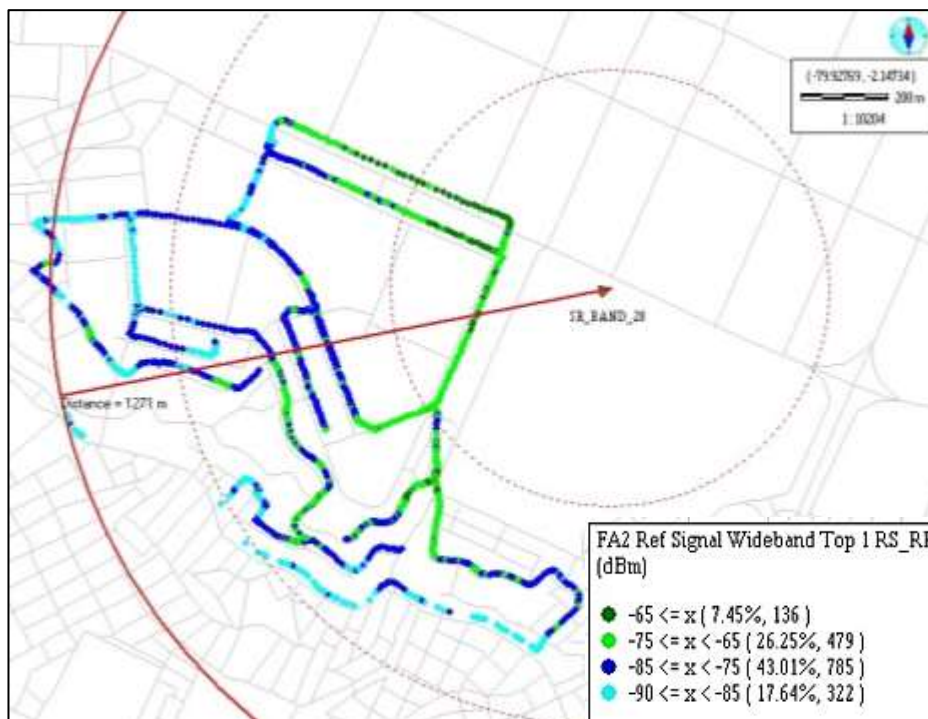


Figura 4.10: Niveles RSRP (LTE APT700) considerando únicamente muestras mayores a -90 dBm.

Fuente: XCAP Log Analysis & Reporting, Accuver

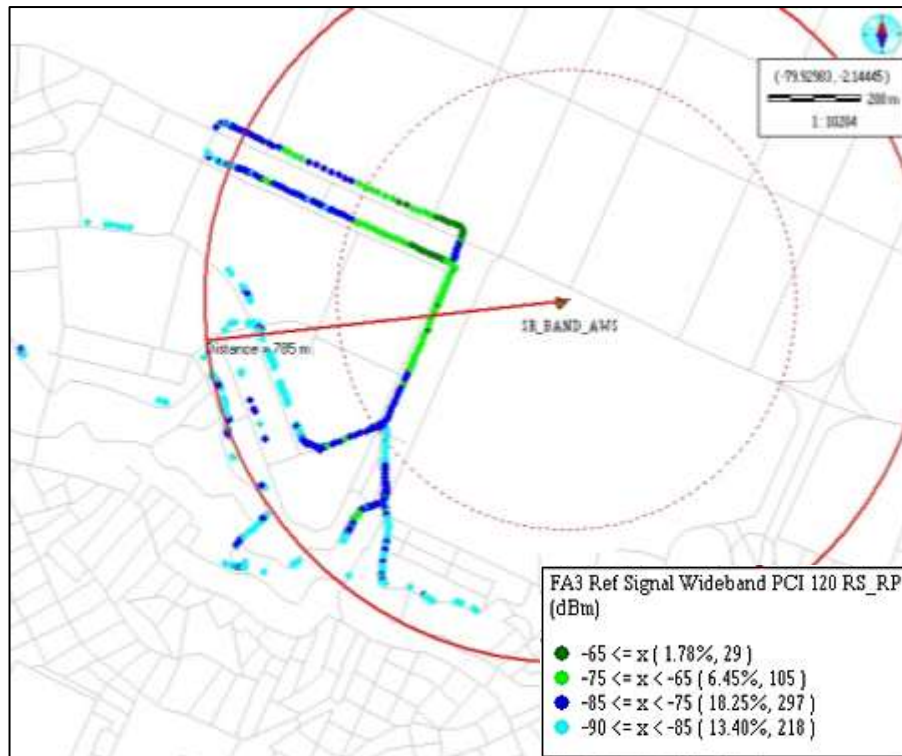


Figura 4.11: Niveles RSRP (LTE AWS) considerando únicamente muestras mayores a -90 dBm.

Fuente: XCAP Log Analysis & Reporting, Accuver

El comportamiento de la cobertura APT700 (figura 4.10) registra muestras a una distancia aproximada de hasta 1.2 Km con niveles que ofrecen estabilidad en los servicios móviles. En contraste, se observa la propagación de AWS (figura 4.11) hasta tan solo 785 metros antes de que comience a degradarse la intensidad de la señal por debajo de -90 dBm.

Finalmente, se presenta un gráfico comparativo de niveles de recepción (figura 4.12) el cual clarifica y confirma una vez más, que la señal RSRP operando en 700 MHz tiene un rendimiento superior a la banda AWS. APT700 se convierte en una alternativa óptima para el despliegue de redes LTE sobre todo en zonas sub urbanas y rurales.

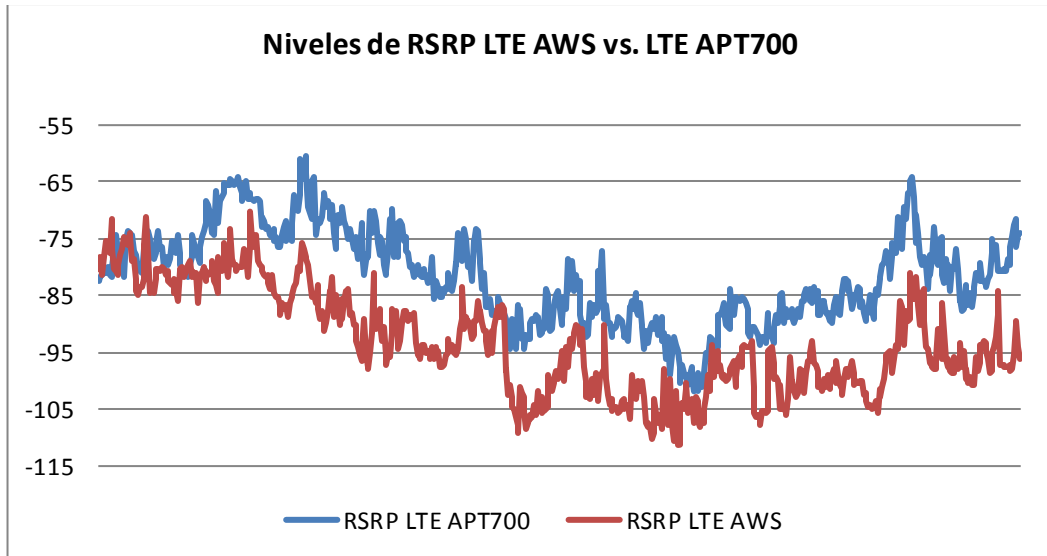


Figura 4.12: Señales comparativas RSRP.

Fuente: El Autor

4.5 DESEMPEÑO DE CALIDAD

4.5.1 RSRQ

El RSRQ proporciona una estimación de la relación señal a ruido más la inclusión de interferencias medidas por el UE considerando únicamente una celda. A continuación se presentan los resultados obtenidos en la banda APT700:

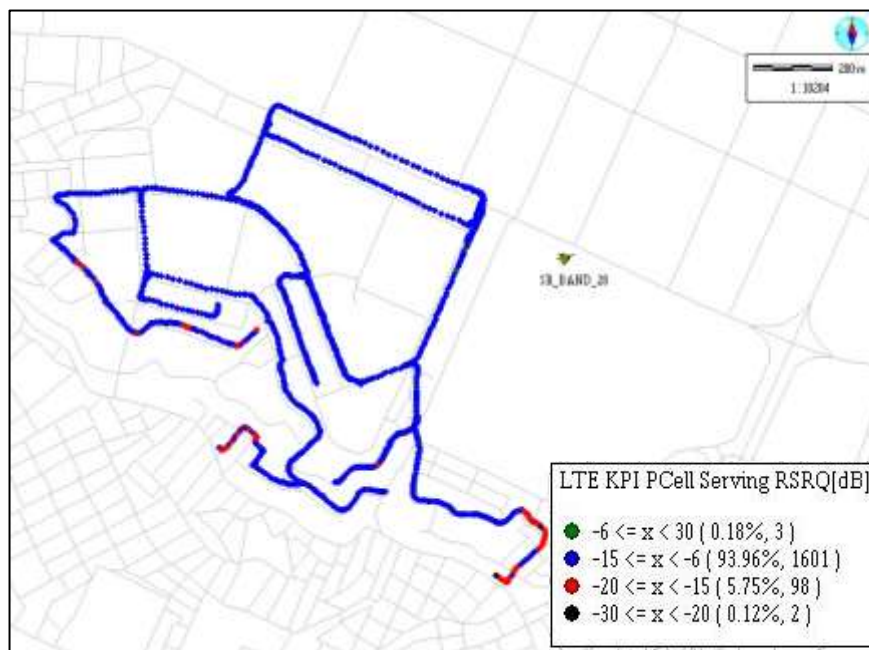


Figura 4.13: Plot de niveles RSRQ para LTE APT700 en zonas suburbanas.

Fuente: XCAP Log Analysis & Reporting, Accuver

Es evidente que existe una agrupación de 1604 muestras mayores a -15 dB las cuales representan un 94.14% del total de mediciones. Con estos valores de RSRQ es posible asegurar que las funcionalidades de handover y reelección serán exitosas. La dispersión de muestras de calidad degradadas es menor del 6%.

4.5.2 SINR

Durante el proceso de estimación de canal en el enlace descendente, el eNodeB recibe notificaciones y reportes por parte del UE acerca del ancho de banda total o ya sea de una sub banda específica. Los CSR contienen la medición del SINR en función del canal percibido para lograr una adecuada transmisión en el canal de DL. El SINR es de vital importancia para alcanzar mayores tasas de transferencia en las sesiones de datos. Los recorridos realizados sobre APT700 se muestran a continuación:

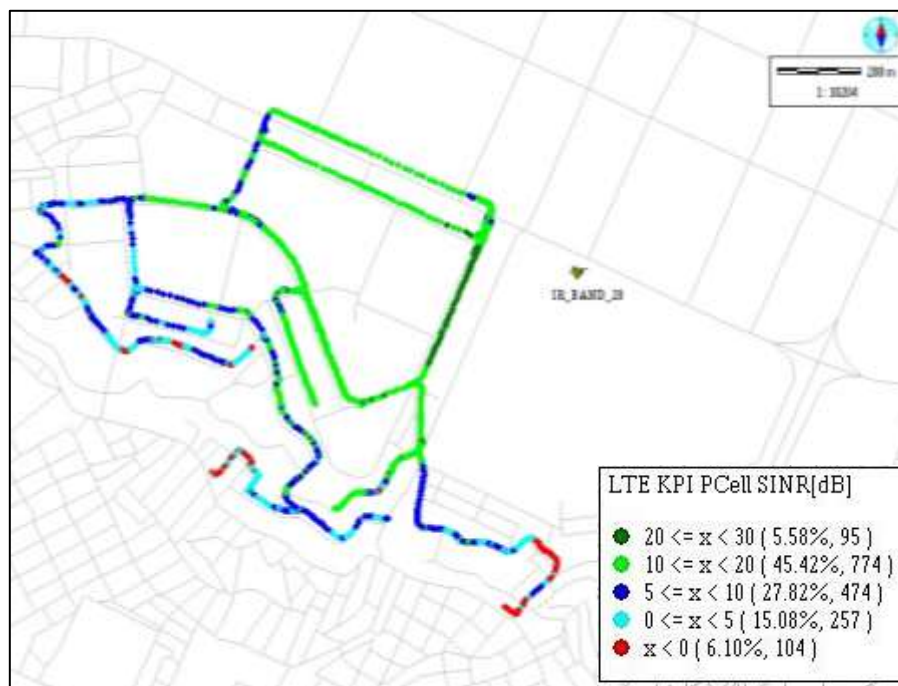


Figura 4.14: Plot del SINR en LTE APT700.

Fuente: XCAP Log Analysis & Reporting, Accuver

Las muestras resultantes de la figura anterior indican valores aceptables de SINR en un 78.82% (≥ 5 dB). Los niveles que se encuentran al borde de la celda representan tan solo un 21,18% (< 5). Es

pertinente afirmar que, en función de dicho comportamiento de SINR el sistema puede establecer criterios y niveles que permitirán una estimación de canal de DL/UL óptima (RI, PMI, CQI) pese a los niveles de ruido e interferencia propia del sistema.

4.5.3 CQI y Esquema de Modulación

Los informes del indicador de calidad del canal proporcionan una medida de las condiciones del canal de enlace descendente que experimenta el UE. El terminal genera valores CQI y los reporta al eNodeB usando los canales PUCCH o PUSCH. Los resultados se muestran en la figura 4.15.

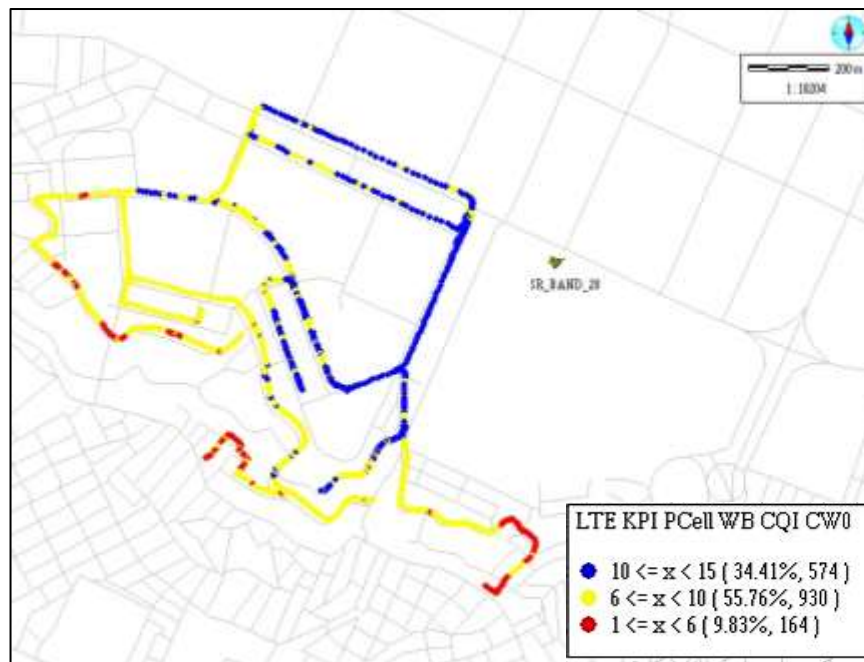


Figura 4.15: Distribución de niveles de CQI en LTE APT700.

Fuente: XCAP Log Analysis & Reporting, Accuver

Acorde a las mediciones es notorio observar un 90.17% de muestras consideradas como buenos valores de CQI. Las condiciones de radio frecuencia durante los recorridos presentaron tan solo un 9.83% de CQI para zonas en borde de celda. Es decir, la mayor parte del tiempo las estimaciones de calidad de canal permiten modulaciones superiores a los 16QAM ofreciendo altas tasas de código y eficiencia bit/símbolo.

La figura 4.16 permite visualizar la distribución de muestras en función del esquema de modulación adaptado en el enlace. Se visualizan concentraciones por encima del 75% del total de muestras con adaptaciones de esquemas de modulaciones de 16QAM y 64QAM. Tales modulaciones ofrecen eficiencia en la transmisión de datos de hasta 5 bits/símbolo/Hz con una tasa de codificación de 0.93. (Tabla 2.6)

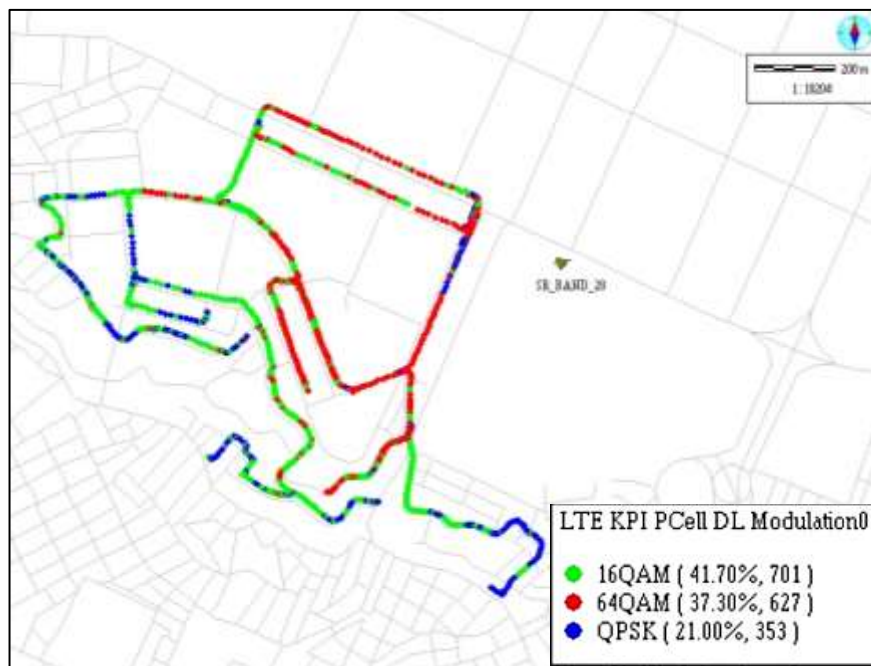


Figura 4.16: Esquemas de Modulación en LTE APT700.

Fuente: XCAP Log Analysis & Reporting, Accuver

Como se ha dicho, de acuerdo al rendimiento CQI evidenciado en la figura 4.15, es más probable que la adaptación de enlaces asigne altos esquemas a los valores de CQI altos del UE. Un 41.70 % para modulaciones 16QAM y un 37.30 % transmitiendo con esquema 64QAM. El eNodeB utiliza estos informes CQI dentro de sus algoritmos de programación y adaptación de enlaces.

4.6 Desempeño de Interfaz Aire

4.6.1 Rendimiento de Throughput

Previa la transmisión de paquetes IP en la interfaz aire, se encuentra la capa de enlace. Una de las subcapas protagonistas en la medición de desempeño es la subcapa Radio Link Control (RLC). En ella

se realizan funciones de corrección de errores a través de herramientas como ARQ entre otras. Las siguientes figuras muestran los resultados de tasas de transferencia de datos mediante plots.

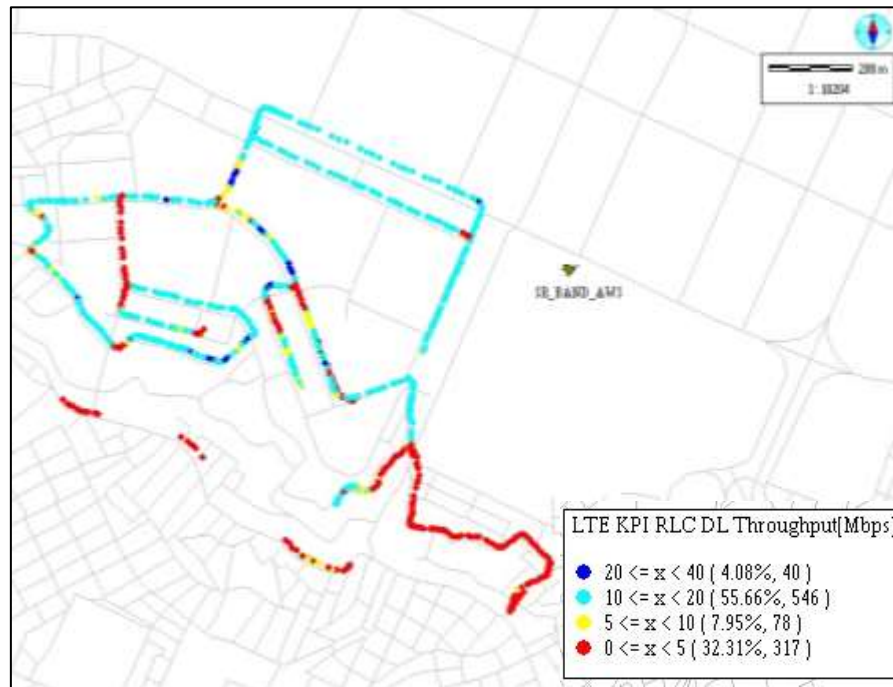


Figura 4.17: Plot de throughput RLC DL para LTE AWS.

Fuente: XCAP Log Analysis & Reporting, Accuver

De acuerdo a la figura anterior se registra un total de 55.66% muestras para tasas de transmisión por encima de los 10Mbps y tan solo un 4.08% superior a los 20Mbps. Se puede decir que son mediciones aceptables, sin embargo, se conoce que LTE puede ofrecer mejores velocidades de transmisión en DL. Es importante resaltar que un 32.31% del total obtuvo una fluctuación por debajo de los 5 Mbps.

En contraste con los resultados anteriores, las muestras obtenidas durante la sesión de datos en la banda APT700, demuestran un incremento en un 28,31% para tasas superiores a 20Mbps (figura 4.18). Es importante mencionar que, existen tasas por encima de los 40 Mbps correspondientes a un 2.74% de muestras.

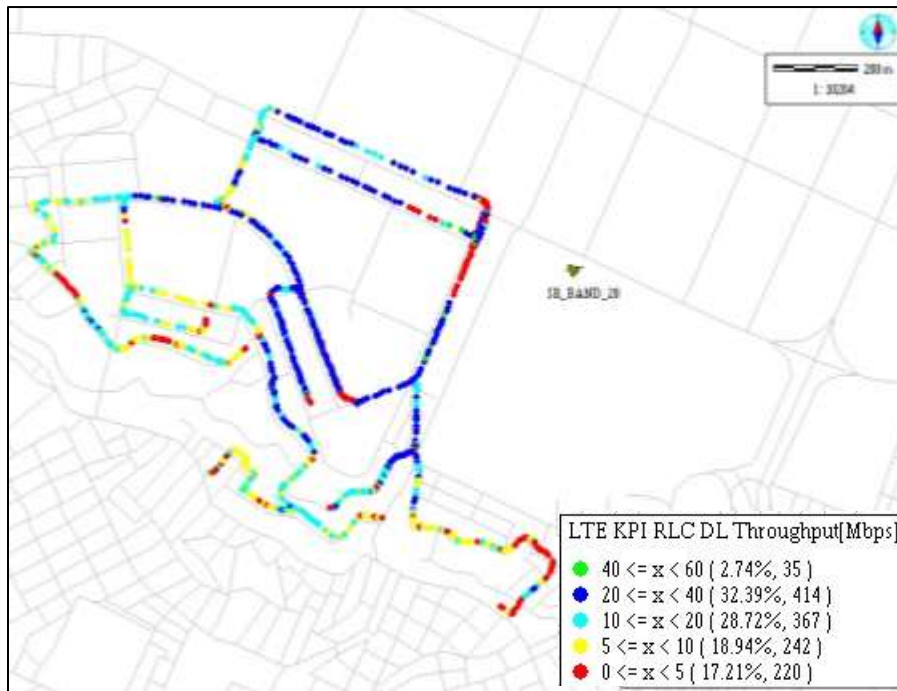


Figura 4.18: Plot de throughput RLC DL para LTE APT700.

Fuente: XCAP Log Analysis & Reporting, Accuver

No solo los plots indican el comportamiento de la capa RLC en DL sino también las figuras 4.18 y 4.19 en las cuales se muestra mediante gráficas en línea de tiempo los mínimos y máximos obtenidos.

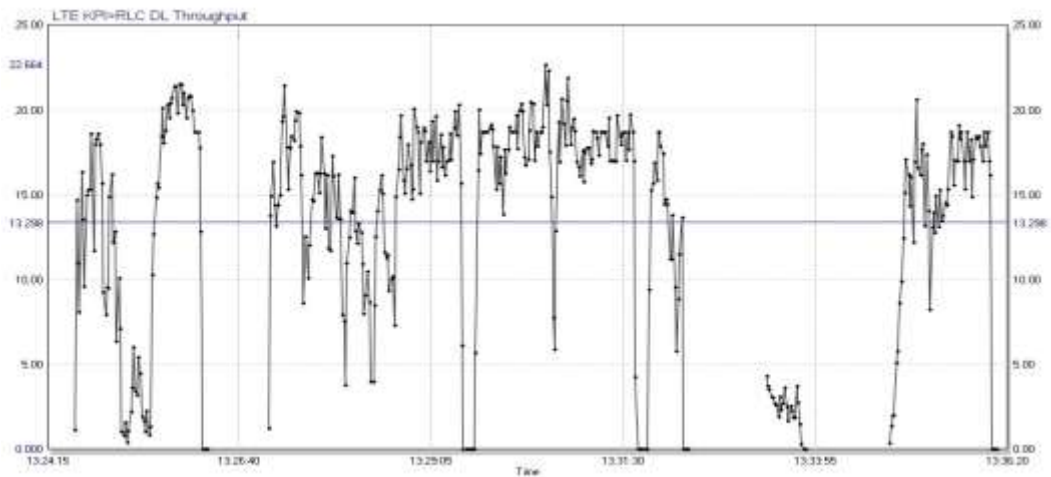


Figura 4.19: Tasas de transmisión de datos en RLC DL para LTE AWS.

Fuente: XCAP Log Analysis & Reporting, Accuver

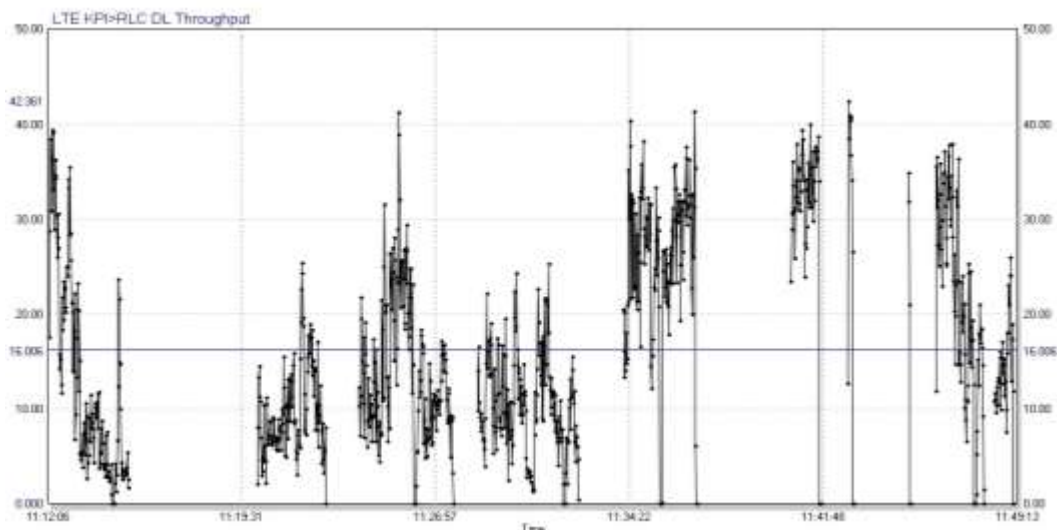


Figura 4.20: Tasas de transmisión de datos en RLC DL para LTE APT700.

Fuente: XCAP Log Analysis & Reporting, Accuver

En el caso de las pruebas de DL para la banda AWS (figura 4.19) el valor promedio se encuentra sobre los 13 Mbps y se observan picos de hasta 22Mbps. No obstante, el sistema APT700 (figura 4.20) registra valores máximos de hasta 42 Mbps durante varias sesiones de datos realizadas (equivale aprox. 2 veces que niveles de throughput RLC en AWS).

De igual manera, si se comparan los valores medios de ambas señales se observa un mejor rendimiento sobre la banda 28 con 16Mbps a diferencia de AWS.

4.6.2 Conexión RRC

El establecimiento de la conexión RRC (Radio Resource Control) se utiliza para hacer la transición del modo inactivo RRC (idle mode) al modo conectado RRC. El UE debe realizar la transición al modo conectado RRC antes de transferir los datos de la aplicación o de completar cualquier procedimiento de señalización.

En el caso de LTE, el mensaje inicial del Estrato de No Acceso (NAS) se transfiere como parte del procedimiento de establecimiento de la conexión RRC. Como resultado de las pruebas realizadas se observa en

la figura 4.21 un éxito del 100% del total de 15 sesiones RRC solicitadas a la red, garantizando el establecimiento de las prestaciones y servicios LTE.

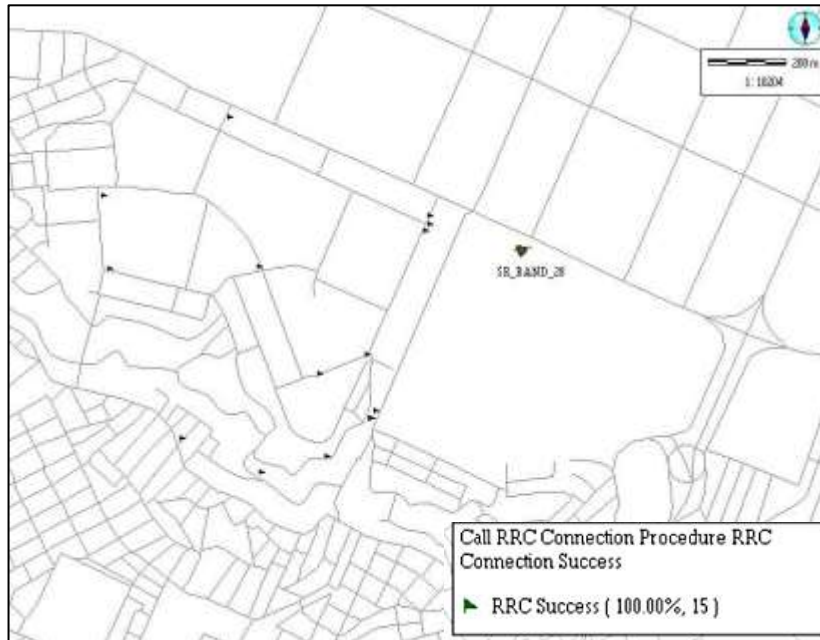


Figura 4.21: Ilustración de eventos exitosos de procedimientos RRC en el establecimiento de sesiones de usuario en la banda LTE APT700.

Fuente: XCAP Log Analysis & Reporting, Accuver

CONCLUSIONES

Una vez concluido el presente proyecto de investigación se considera importante derivar y deducir de los resultados y mediciones, las siguientes afirmaciones:

1. El sistema radiante en los 700 MHz garantiza operabilidad y transmisión. Posee una configuración estándar en cuanto a parámetros de inclinación, ganancia de antena, patrón de radiación, directividad y potencias para su operación, minimizando la posibilidad de sombras de cobertura. LTE APT700 ofrece versatilidad en la asignación de anchos de banda. (15 MHz utilizables)

La altura de la antena contribuye al sistema a enfrentar las pérdidas por multitrayectoria y FSL. Al ser una tecnología de sub portadoras, el esquema OFDMA provee flexibilidad y robustez frente los desvanecimientos a larga y corta escala, principalmente en asentamientos irregulares.

2. La implementación del sistema LTE APT700 tiene un rendimiento óptimo dentro de los parámetros estimados. A pesar de coexistir con el despliegue actual LTE AWS, el sistema es confiable: ofrece conectividad permanente en el contexto RRC (cero sesiones fallidas), permite altas tasas de transferencia de datos (mayores a 40 Mbps), los niveles de SINR se encuentran por encima de 10 dB para más del 50% de muestras y registra un promedio de recepción de señal de -79.49 dBm.
3. Al contrastar los resultados de niveles RSRP de los sistemas LTE AWS versus LTE APT700, es evidente observar el incremento de cobertura del sistema propuesto. Zonas donde la cobertura LTE AWS es deficiente (< -105 dBm), APT700 lo resuelve con valores de hasta -80 dBm.

Además, al mejorar los niveles outdoor en zonas urbanas, se tienen mejoras directamente en la cobertura indoor. Las bajas frecuencias pueden penetrar más fácilmente en los edificios, propiedad innata de las ondas electromagnéticas.

4. APT700 maximiza la cobertura, provee estabilidad en los servicios móviles y aumenta la eficiencia de la red LTE. Al ser un sistema sobre la banda de los 700 MHz las frecuencias bajas cubren áreas más amplias. Esta declaración se sustenta al contrastar gráficamente los comportamientos individuales RSRP y comparar estadísticas de funciones PDF/CDF. Es notoria la mejoría aún en los valores medios siendo ésta superior a 14 dBm de ganancia para el sistema propuesto. ($\mu_{RSRP-AWS} = -94.26$ dBm ; $\mu_{RSRP-APT700} = -79.49$ dBm)

Las llamadas de datos del usuario (o sesiones UE) no presentaron eventos adversos como intermitencia en el flujo de paquetes IP, conexiones caídas (drop call) o setup fallidos durante el establecimiento de la conexión RRC. Los parámetros de calidad y estimación de canal permiten una comprensión del rendimiento del sistema y de la interfaz aire.

El incremento de cobertura reduce los costos de implementación puesto que, se planificarán menos estaciones base en los procesos de despliegue. El sistema LTE APT700 es una alternativa eficiente para el escalamiento de redes inalámbricas móviles, sobre todo, en zonas denso urbana, sub urbanas y rurales.

RECOMENDACIONES

A partir del análisis realizado en la investigación y las conclusiones obtenidas se recomiendan los siguientes temas:

1. Realizar un estudio de planificación y despliegue de una red LTE APT700 versus AWS para zonas suburbanas. Si bien es cierto, se corroboró la ventaja que existe sobre el sistema LTE AWS (en cuanto a cobertura), pero es posible mediante el modelamiento y simulaciones especificar y determinar la optimización de parámetros de capacidad, tráfico, sectorización de antenas, recursos de red, costos de implementación y encontrar la relación y proporción de eNodeB.
2. Investigar sobre la inclusión y rendimiento de LTE-Advanced en la banda APT700. El sistema LTE se puede combinar fácilmente con otras bandas para proporcionar servicios de Carrier Aggregation-CA (Agregación de portadora). LTE APT700 con CA ya está en uso por más de 10 operadores en todo el mundo.
3. Profundizar los conocimientos de la banda 700 para entornos IoT. APT700 es una opción perfecta para aprovechar nuevos servicios como NB-IoT debido a sus importantes ventajas de propagación. Uno de los enfoques del internet de las cosas son las redes LPWAN la cual se centra en crear conexiones a internet objetos cotidianos que solicitan cantidades mínimas de datos en períodos prolongados. NB-IoT revoluciona el futuro del 5G de una forma más convincente.
4. Planificar pruebas y mediciones de campo para comprender la coexistencia de servicios LTE APT700 frente a sistemas de difusión como Televisión Digital (ISDB-Tb) y descartar posibles interferencias de sistemas externos.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

3G	Tercera Generación Móvil
3GPP	Proyecto Asociación de Tercera Generación
APAC	Región Asia-Pacífico
APT	Telecomunidad Asia-Pacífico
APT700	Telecomunidad Asia-Pacífico en banda 700 MHz.
ARCOTEL	Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones
AWGN	Ruido Blanco Gaussiano Aditivo
AWS	servicios inalámbricos avanzados en banda 4
BLER	Tasa de error de bloque
CA	Proyecto de Asociación de Tercera Generación
CDF	Función de distribución acumulativa
CDMA	Función de densidad de probabilidad
CN	Red Central
CSFB	Circuito conmutado hacia atrás
EIRP	Potencia radiada isotrópica efectiva
EPC	Núcleo de paquetes evolucionado
ETSI	Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones
E-UTRA	Acceso de radio terrestre UMTS Evolucionado
FDD	Duplexación por división de frecuencia
FDMA	División de frecuencia de acceso múltiple
GSA	Asociación global de proveedores móviles
GSM	Unión Internacional de Telecomunicaciones
HSDPA	Acceso a Paquetes de Alta Velocidad
HSS/HLR	Residencia Servidor de Suscriptor / Ubicación Registro
HSUPA	Acceso a paquetes de alta velocidad de enlace ascendente
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
IMT	Telecomunicaciones móviles internacionales
ISI	Interferencia inter-simbólica
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones
LAN	Red de área local

LPWAN	Red de área amplia de baja potencia
LTE	Evolución a largo plazo
MAPL	Pérdida máxima permitida del camino
MME	Entidad de Gestión de la Movilidad
NAS	Capas de No-Acceso
OFDMA	Acceso a multiplexación ortogonal por división de frecuencia
PCRF	Función de política y reglas de tarifa
PDNG	Puerta de enlace a la red de paquete de datos
P-SCH	Canal de sincronización primario
PUCCH	Canal físico de control de enlace ascendente
PUSCH	Canal físico compartido de enlace ascendente
RAT	Tecnología de acceso de radio
RB	Portador de radio
RLC	Control de enlace de radio
RNC	Controlador de red de radio
RRC	Control de recursos de radio
RS	Señal de Referencia
RSRP	Señal de Referencia de Potencia Recibida
RSRQ	Señal de Referencia de Calidad Recibida
RSSI	Indicador de Potencia de la Señal Recibida
SGW	Puerta de enlace de servicio
SINR	Relación señal a interferencia más ruido
SMLC	Centro de ubicación móvil de servicio mejorado
TCP	Protocolo de Control de Transmisión
TDD	Duplexación por división de tiempo
TDMA	División de tiempo de acceso múltiple
UDP	Protocolo de datagramas de usuario
UE	Equipo de usuario
UMTS	Servicio Universal de Telecomunicaciones Móviles.
VoIP/VoLTE	Voz sobre Protocolo de Internet / Voz sobre LTE
VSWR	Relación de onda estacionaria de voltaje
WCDMA	Banda Ancha de Acceso múltiple por División de Códigos

REFERENCIAS

- Accuver (2018). Products Network Optimization Solution. Recuperado de: <http://accuver.com/products/network-optimization/>
- Agusti, R., Bernardo, F., Casadevall, F., Ferrús, R., Pérez, J., & Sallent, O. (2010). LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles. Fundación VODAFONE España.
- Cáceres, J. (2014). Planificación radioeléctrica de una red LTE. Tesis de Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación, Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Dahlman, E., Jading, Y., Parkvall, S., & Murai, H. (2009). 3G Radio Access Evolution-HSPA and LTE for Mobile Broadband. *IEICE Transactions on Communications*, 92 (5), 1432-1440
- Dennys, R. (2006). Satellite Communications (4th. Edition). U.S.A.: McGraw-Hill.
- ERICSSON (2013). APT700 A Truly Global LTE Band. Ericsson SE-126 Stockholm, Sweden.
- ETSI 3rd Generation Partnership Project (3GPP), (2018). LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 15.3.0 Release 15).
- Goldsmith, A. (2005). Wireless Communications. Stanford University: Cambridge University Press
- Iglesias, L. (2016). Planificación y Optimización de una red LTE con la herramienta ATOLL. Proyecto de fin de carrera de Ingeniero Superior de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Catalunya, Catalunya.
- Jaramillo, P. (2017). Diseño de Cobertura de Telecomunicaciones LTE para el sector de Guajalo para la empresa constructora Daniel

Ayala TRT S.A. Trabajo de titulación de Ingeniero Electrónico, Universidad Politécnica Salesiana, Quito.

Johnson, C. (2012). Long Term Evolution IN BULETS (2nd. Edition). Northampton, England: Companion website www.lte-bullets.com

Kaveh, P., & Allen, H. L. (2005). Wireless Information Networks (2nd. Edition). New Jersey: WILEY

Khan, F. (2009). LTE for 4G Mobile Broadband. New York: Cambridge University Press.

Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información (2012). Conatel aprueba Regulación que permitirá a Ecuador vertiginoso crecimiento Tecnológico 4g. Quito, Ecuador: *Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información*. Recuperado de <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/conatel-aprueba-regulacion-que-permitira-a-ecuador-vertiginoso-crecimiento-tecnologico-4g/>

Ming Zhi, L., Yun Fei, M., & Coelho, A., E. (2016). LTE APT700 whitepaper (v2.0). HUAWEI TECHNOLOGIES CO., LTD.

Mitsutake, D., Mello, L., & Rodríguez, C. (2013). Comparison of coverage and capacity of LTE-advanced networks at 700 MHz and 2.6 GHz. *2013 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC)*. DOI: 10.1109/IMOC.2013.6646573

Mullahmetov, D., Fadeev, V., Gaysin, A., & Nadeev, A. (2018). Empirical analysis of LTE network coverage quality. *2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8456993

Pastrav, A., Tataru, D., Bara, A., Palade, T., & Puschita, E. (2014). Key performance indicators evaluation for LTE networks implementation. *2014 11th International Symposium on Electronics*

and Telecommunications (ISETC).
DOI: 10.1109/ISETC.2014.7010782

Pietrosemoli, E., Zennaro, M., Fonda, C., Okay, S., Aichele, C., Büttrich, S., Forster, J., Wierenga, K., Vyncke, E., Baikie, B., Hosnan, L., Ginguld, M., Togo, E., & The Open Institute (2013). *Redes Inalámbricas En Los Países En Desarrollo* (4ta. ed.). Jane Butler bajo la licencia Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0

Puttonen, J., Turkka, J., Alanen, O., & Kurjenniemi, J. (2010). Coverage optimization for Minimization of Drive Tests in LTE with extended RLF reporting. *21st Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. DOI: 10.1109/PIMRC.2010.5671907

Radio bases por operador y tecnología nivel provincial Septiembre 2018 R. (2018, Octubre). [hoja de cálculo de Microsoft Excel]. Ecuador: Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones. Disponible en:

<http://www.arcotel.gob.ec/servicio-movil-avanzado-sma/> [2019, 15 de febrero].

Rappaport, T. (2002). *Wireless Communications Principles and Practice* (2nd. Edition). U.S.A.: Prentice Hall

Rengifo, A. (2016). *Diseño de Cobertura de Telefonía Móvil con Tecnología GSM en un área rural de la Provincia del Guayas en el Ecuador*. Trabajo de Titulación Magister en Telecomunicaciones, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil.

Rumney, M. (2012, Octubre). *3GPP LTE Standards Update: Release 11, 12 and Beyond*. Ponencia realizada por Agilent Technologies. Technology Leadership Organization.

Saltos, J. (2016). *Diseño de una red LTE usando espectros combinados AWS y 700 APT*. Trabajo de titulación de Ingeniero en

Telecomunicaciones, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil.

Saunders, S., & Aragón, A. (2007). *Antennas and Propagation Wireless Communication Systems* (2nd. Edition). Inglaterra: WILEY

Sesia, S., Toufik, I., & Baker, M. (2011). *LTE the UMTS Long Term Evolution* (2nd. Edition). Reino Unido: WILEY

Seybold, J. (2005). *Introduction to RF Propagation*. New Jersey: WILEY

TONGYU COMMUNICATION (2015). Serie de estaciones base Antena de una sola frecuencia 698-894, 65° TDJ-708017DE-65F. Recuperado de

http://oa.tongyucom.com:8018/tyoa/menu/SonSys/Products/myweb/product_cn_web/ProductView.php?rootid=38&specid=TDJ-708017DE-

[65F.%E9%80%9A%E7%94%A8&PHPSESSID=3a0036703351e47628fbc179d44c9012](http://oa.tongyucom.com:8018/tyoa/menu/SonSys/Products/myweb/product_cn_web/ProductView.php?rootid=38&specid=TDJ-708017DE-65F.%E9%80%9A%E7%94%A8&PHPSESSID=3a0036703351e47628fbc179d44c9012)

Tse, D., & Viswanath, P. (2005). *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge University Press

Wu, C., & Baker, K. (2012). Comparison of LTE Performance Indicators and Throughput in Indoor and Outdoor Scenarios at 700 MHz. *2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*. DOI: 10.1109/VTCFall.2012.6399246

ZTE Corporation (2013). *LTE APT 700MHz Best choice for nationwide coverage*. ZTE Corporation.



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Tapuy Rendón, Sahél Josué**, con C.C: # 1206392456 autor del trabajo de titulación: **Propuesta para la ampliación de cobertura LTE en zonas suburbanas mediante la Implementación de un sistema radiante en la banda APT700**, previo a la obtención del título de **Magister en Telecomunicaciones**, en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, **19 de Julio del 2019**

f. _____

Nombre: **Tapuy Rendón, Sahél Josué**

C.C: **1206392456**



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Propuesta para la ampliación de cobertura LTE en zonas suburbanas mediante la implementación de un sistema radiante en la banda APT700.		
AUTOR(ES)	Tapuy Rendón, Sahél Josué		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	MSc. Luis Córdova Rivadeneira; MSc. Orlando Philco Asqui; MSc. Manuel Romero Paz		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Sistema de Posgrado		
CARRERA:	Maestría en Telecomunicaciones		
TÍTULO OBTENIDO:	Magister en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	19 de Julio de 2019	No. DE PAGINAS:	106
ÁREAS TEMÁTICAS:	Ondas de Radio, Antenas, Modelos de Propagación, Sistema Radiante		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	LTE, AWS, APT700, huella de cobertura, RSRP, RSRQ		
RESUMEN/ABSTRACT:	<p>En este trabajo de titulación se realizó un estudio cuyo propósito fue elaborar una propuesta de un sistema radiante LTE que ofrezca un mejor rendimiento de cobertura en áreas suburbanas, que garantice estabilidad en los servicios de packet switching y que coexista con sistemas físicos LTE desplegados. Para tal efecto, se seleccionó la banda de APT700 como frecuencia de operación y se planteó una configuración estándar para los parámetros físicos y de radiación para una celda. Se interactuó con los sistemas LTE (AWS/APT700) mediante tareas establecidas en UE para prestaciones de PS con el objetivo de establecer criterios y comparaciones. Los niveles de RSRP, RSSI, RSRQ, CQI, SINR fueron recolectados mediante instrumentos de ingeniería RF (escáner, UE, GPS, antena). Se utilizó software profesional Accuver: para la lectura de la interfaz aire XCAL, y para el post procesado de datos XCAP. Los resultados evidencian que existe una mejoría notable en la distribución de niveles de RSRP, mayor huella de cobertura que AWS, estabilidad en la conmutación de paquetes y estimaciones de calidad de canal aceptables. Por lo tanto se concluye que el funcionamiento LTE sobre la banda de 700 MHz tiene resultados positivos para el despliegue de cobertura y ventaja en entornos suburbanos, convirtiéndose en la mejor opción para cobertura nacional.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono:+593-993765583	E-mail: sahel.tapuy@gmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::	Nombre: Manuel Romero Paz		
	Teléfono: +593-994606932		
	E-mail: manuel.romero@cu.ucsg.edu.ec		
SECCION PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACION:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			