



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E
INDUSTRIAL
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
COMUNICACIONES

TEMA:

“SIMULACIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN COST 231 WALFISCH-IKEGAMI PARA EL CANAL MÓVIL DE BANDAS 4G”

Trabajo de Graduación. Modalidad: Proyecto de Investigación, presentado previo la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones.

SUBLÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Comunicaciones Inalámbricas
AUTORA: Joanna del Carmen Vaca Calero
TUTOR: Ing. MSc. Carlos Alberto Serra Jiménez

AMBATO – ECUADOR

Diciembre 2015

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el Tema:

“SIMULACIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN COST 231 WALFISCH-IKEGAMI PARA EL CANAL MÓVIL DE BANDAS 4G”, de la señorita Joanna del Carmen Vaca Calero, estudiante de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, considero que el informe investigativo reúne los requisitos suficientes para que continúe con los trámites y consiguiente aprobación de conformidad con el numeral 7.2 de los Lineamientos Generales para la aplicación de Instructivos de las Modalidades de Titulación de las Facultades de la Universidad Técnica de Ambato.

.

Ambato, Diciembre de 2015.

EL TUTOR

Ing. MSc. Carlos Alberto Serra Jiménez

AUTORÍA

El presente trabajo de investigación titulado: SIMULACIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN COST 231 WALFISCH-IKEGAMI PARA EL CANAL MÓVIL DE BANDAS 4G. Es absolutamente original, auténtico y personal, en tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, Diciembre de 2015

Joanna del Carmen Vaca Calero

CC: 180475375-2

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga uso de este Trabajo de Titulación como un documento disponible para la lectura, consulta y procesos de investigación.

Cedo los derechos de mi Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública. Además autorizo su reproducción dentro de las regulaciones de la Universidad.

Ambato, Diciembre de 2015

Joanna del Carmen Vaca Calero

CC: 180475375-2

APROBACIÓN COMISIÓN CALIFICADORES

La Comisión Calificadora del presente trabajo conformada por los señores docentes Ing. Vicente Morales, Ing. Geovanni Brito e Ing. Santiago Altamirano, revisó y aprobó el Informe Final del trabajo de graduación titulado “SIMULACIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN COST 231 WALFISCH-IKEGAMI PARA EL CANAL MÓVIL DE BANDAS 4G”, presentado por la señorita Joanna del Carmen Vaca Calero de acuerdo al numeral 9.1 de los Lineamientos Generales para la aplicación de Instructivos de las Modalidades de Titulación de las Facultades de la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Vicente Morales, Mg.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. Geovanni Brito, Mg.
DOCENTE CALIFICADOR

Ing. Santiago Altamirano, Mg.
DOCENTE CALIFICADOR

DEDICATORIA

A Dios y a la Virgencita por las bendiciones que he recibido durante todo este tiempo.

A mi mami Gardenia y a mi hermana Shantal por el apoyo y la ayuda que me han brindado pese a mis fallas y por estar conmigo en las buenas y en las malas.

A mi hijo que se ha convertido en mi mayor milagro y en un motivo más para luchar por mis metas.

A Mamita Esther por sus palabras y a mi abuelito que desde el cielo espero que se sienta feliz por mí.

Joanna del Carmen Vaca Calero

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi mami por ser padre y madre por sus consejos y no dejarme nunca sola, por ser mi pilar y mi guía en momentos de angustia, a mi hermana que en peleas y todo sabe que la quiero, gracias a su paciencia, espero que sea mucho mejor que yo.

A mi Dios y a mis santitos por a ver puesto en mi camino personas que me han ayudado a crecer como persona y ahora como profesional.

A mi tutor al Ing. Carlos Serra por su enorme ayuda y apoyo en la elaboración de mi proyecto, las palabras se quedan cortas para toda la gratitud que le tengo.

A todos mis profesores por los conocimientos que me han brindado durante mi transcurso por los semestres, a mis amigos por su colaboración.

A una persona muy especial que sin ser mi padre me ayudado a terminar mis estudios, a mis tíos y primos por sus palabras de aliento.

Gracias por formar parte de mis logros.

Joanna del Carmen Vaca Calero

ÍNDICE

Contenido	Pág.
APROBACIÓN DEL TUTOR	ii
AUTORÍA	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN COMISIÓN CALIFICADORES	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
ÍNDICE	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
GLOSARIO DE TÉRMINOS	xvi
INTRODUCCIÓN	xxiii
CAPÍTULO I	1
EL PROBLEMA	1
1.1 Tema	1
1.2 Planteamiento del Problema	1
1.3 Delimitación.....	2
1.4 Justificación	2
1.5 Objetivos	3
1.5.1 Objetivo General.....	3

1.5.2 Objetivos Específicos	3
CAPÍTULO II.....	4
MARCO TEÓRICO	4
2.1 Antecedentes Investigativos	4
2.2 Fundamentación Teórica.....	5
2.2.1 Introducción a los Sistemas de Telefonía Móvil Celular.....	5
2.2.2 Conceptos Básicos	8
2.2.3 Evolución de la Telefonía Móvil Celular	12
2.2.4 Estándar LTE. Introducción.....	15
2.2.5 Arquitectura de los Sistemas LTE	16
2.2.6 Interfaces.....	22
2.2.7 Protocolos	26
2.2.8 Tramas de radio	27
2.2.9 Estructura de canales en LTE	29
2.2.10 Tecnologías contempladas en LTE.....	33
2.2.11 Fundamentos de OFDMA y SC-FDMA.....	33
2.2.12 Modelos de Propagación. Introducción	40
2.2.13 Modelo de QoS	41
2.2.14 Canales de Radio	44
2.2.15 Flexibilidad en la banda de despliegue	45
2.3 Propuesta de solución	48
CAPÍTULO III.....	49
METODOLOGÍA	49

3.1 Modalidad de la Investigación	49
3.2 Recolección de Información	49
3.3 Procesamiento de la información.....	49
3.4 Desarrollo del proyecto.....	50
CAPÍTULO IV	51
DESARROLLO DE LA PROPUESTA	51
4.1 Características Técnicas de las Redes LTE	51
4.2 Clasificación de los modelos de propagación.....	54
4.3 Distribuciones Estadísticas de la Propagación Radioeléctrica	61
4.4 Ventajas de LTE	66
4.5 Desarrollo de la simulación	66
4.5.1 Diagrama de flujo	66
4.5.2 Programación	67
4.5.3 Descripción de la simulación	73
4.5.4 Presentación de la simulación.....	73
4.5.5 Simulación del modelo de propagación COST 231 WI	78
4.5 Análisis y Discusión de resultados	83
CAPÍTULO V.....	85
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	85
5.1 Conclusiones.....	85
5.2 Recomendaciones	85
BIBLIOGRAFÍA	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla2.1: Categorías de terminales de LTE Release 8.....	29
Tabla2.2: Bandas mejor identificadas para el despliegue de LTE en la Release	46
Tabla 4.1: Velocidades de LTE con diferentes configuraciones de antenas y modulaciones.53	
Tabla 4.2 Ejemplos de las pérdidas obtenidas	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2. 1: Estructura de células hexagonales	9
Fig.2. 2: Estructura de la Red GSM	14
Fig.2. 3: Arquitectura de una red LTE	17
Fig.2. 4: Distribución de funciones en la E-UTRAN (eNB/EPC).....	18
Fig.2. 5: Arquitectura plana de LTE.....	18
Fig.2. 6: Arquitectura E-UTRAN (RAN en LTE).....	19
Fig.2. 7: Arquitectura Core en LTE	20
Fig.2. 8: Arquitectura RAN y Core del Sistema LTE	22
Fig.2. 9: Estructura de tramas radio en LTE para FDD	24
Fig.2. 10: Torre de protocolos de la interfaz <i>S1</i> en el plano de control.	25
Fig.2. 11: Torre de protocolos de la interfaz <i>X2</i>	26
Fig.2. 12: Pila de protocolos en las interfaces radio <i>Uu</i> y <i>S1-MME</i>	26
Fig.2. 13: Pila de protocolos en la interfaces <i>S10</i> y <i>S11</i>	27
Fig.2. 14: Estructura de una trama radio de LTE.	27
Fig.2. 15: Estructura de canales en LTE, en las diferentes capas.....	30
Fig.2. 16: Representación de una señal OFDM en frecuencia y en el tiempo.	35
Fig.2. 17: Diagrama de funcionamiento de OFDM y OFDMA.	35
Fig.2. 18: Diagramas de funcionamiento de OFDMA y SC-FDMA.	37
Fig.2. 19: Parámetros de QoS en el sistema LTE.....	43
Fig.2. 20: Tipos de canal en Radiocomunicaciones.	44
Fig.4. 1: Difracción y Reflexión.....	58
Fig.4. 2: Método Walfish-Ikegami.	59

Fig.4. 3: Papel de Rayleigh.	63
Fig.4. 4: Diagrama de Flujo.....	67
Fig.4. 5: Ingreso a Matlab.	73
Fig.4. 6: Abrir GUIDE	74
Fig.4. 7: Crear un nuevo GUI.....	74
Fig.4. 8: GUI en blanco	75
Fig.4. 9: Presentación del proyecto.	75
Fig.4. 10: Interfaz de la simulación.....	77
Fig.4. 11: Ingreso de los parámetros de entrada.....	77
Fig.4. 12: Resultados de la simulación.....	78
Fig.4. 13: Simulación del modelo COST 231 WI.	80
Fig.4. 14: Datos de entrada.....	81
Fig.4. 15: Resultados de las pérdidas de la señal	81
Fig.4. 16: Gráficas de las pérdidas en función del tiempo y la frecuencia.....	82

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realiza la simulación del canal móvil de bandas 4G utilizando para ello el modelo de propagación COST 231 Walfisch-Ikegami, a través del cual se evalúan parámetros que permiten predecir la calidad de la señal en transmisión y recepción.

Se elabora además un estudio teórico de los principales modelos de propagación para sistemas de comunicaciones móviles utilizados en la actualidad y se realiza una comparación entre ellos con el fin de seleccionar el más adecuado para los fines que se persiguen en el trabajo presentado.

Durante el desarrollo de la investigación se explica en detalles la arquitectura de los sistemas de cuarta generación basados en el estándar LTE por la importancia que tiene en el marco actual de las comunicaciones móviles como estándar de referencia a nivel mundial.

Palabras clave: Propagación, Modelo COST 231 Walfisch-Ikegami, Canal Inalámbrico, LTE.

ABSCTRAC

In the present research the simulation of 4G mobile channel bands is done by using the propagation model COST 231 Walfisch - Ikegami, through which parameters can predict the quality of the signal transmission and reception are evaluated.

A theoretical study of the main propagation models for mobile communication systems used today are well done and a comparison between them in order to select the most suitable for the purpose intended in the work presented is done.

During the development of research is explained in details the architecture of fourth generation systems based on the LTE standard for the importance in the current context of mobile communications as a reference standard worldwide.

Keywords: Propagation, COST 231 Walfisch – Ikegami Model, Channel Wireless, LTE.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

1G: Primera Generación

2G: Segunda Generación

3G: Tercera Generación

3GPP: 3 Generation Partnership Project (Proyecto Conjunto de Tercera Generación)

4G: Cuarta Generación

AMC: Adaptive Modulation and Coding (Modulación y Codificación Adaptativa)

AMPS: Advanced Mobile Phone System (Sistema Avanzada de Telefonía Móvil)

ARP: Allocation and Retention Priority (Prioridad de Asignación y Retención)

ATM: Asynchronous Transfer Mode (Modo de Transferencia Asíncrona)

BCCH: Broadcast Control Channel (Canal de Control de Difusión)

BCH: Broadcast Channel (Canal de Difusión)

BS: Base Station (Estación Base)

BSC: Base Station Controller (Controlador de Estaciones Base)

BSS: Business Support System (Sistema de Apoyo de Negocio)

CCCH: Common Control Channel (Canal de Control Común)

CDMA: Code Division Multiple Access (Acceso Múltiple por División de Código)

CRC: Cyclic Redundancy Check (Verificación por Redundancia Cíclica)

DAMPS: Digital Advanced Mobile Phone System (Sistema Avanzada de Telefonía Móvil Digital)

dB: Decibelio

dB_i: Decibeles sobre radiador isotrópico.

dB_d: Decibeles sobre radiador estándar.

dB_m: Decibelio referido a 1 mW

dBu: Nivel de señal en decibelios y referido a 0,7746 voltios

DCCH: Dedicated Control Channel (Canal Dedicado de Control)

DFT: Discrete Fourier Transform (Transformada Discreta de Fourier)

DL: Downlink (Enlace Descendente)

DL-SCH: Down Link-Shared Channel (Canal Compartido en el Enlace Descendente)

DSL: Digital Subscriber Line (Línea de Abonado Digital)

DSA: Dynamic Spectrum Assigment (Gestión del Espectro Dinámico)

DTCH: Dedicated Traffic Channel (Canal de Tráfico Dedicado)

EDGE: Enhanced Data Rates for Global Evolution (Evolución Global de la Capacidad Mejorada de Datos)

EIR: Equipment Identity Register (Equipo de Registro de Identidad)

eNB: Enhanced Nodo B

EPC: Evolved Packet Core

ETSI: European Telecommunications Standard Institute (Instituto Europeo de los Estándares de Telecomunicaciones)

EUTRA: Evolved UMTS Terrestrial Radio Access

E-UTRAN: Evolved o Enhanced UMTS Terrestrial Radio Access Network

FDD: Frequency Division Duplex (Duplex de División de Frecuencia)

FDMA: Frequency Division Multiple Access (Acceso Múltiple por División de Frecuencia)

FM: Frecuencia Modulada

FS: Estaciones Fijas

GBR: Tasa de Bits Garantizado

GGSN: Gateway GPRS Support Node

GPRS: General Packet Radio Service (Servicio General de Paquetes Vía Radio)

GSM: Global System for Mobile Communications (Sistema Global de Comunicaciones Móviles)

GTP: Protocolo de Túnel de GPRS

HARQ: Hybrid Automatic Repeat ReQuest (Petición de Repetición Automática Híbrida)

HO: Handover

HPLMN: Home Public Land Mobile Network

HSCSD: High-Speed Circuit-Switched Data (Sistema de Transmisión de Datos a Alta Velocidad mediante Circuitos Conmutados)

HSDPA: High Speed Downlink Packet Access (Acceso de Paquetes en el Canal Descendente de Alta Velocidad)

HSPA: High Speed Packet Access (Acceso a Paquetes de Alta Velocidad)

HSPA+: Evolved High Speed Packet Access (HSPA Evolucionado)

HSS: Home Subscriber Server

HTTP: Hypertext Transfer Protocol (Protocolo de Transferencia de Hipertexto)

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica)

IFFT: Inverse Fast Fourier Transform (Transformada Inversa de Fourier)

IMS: IP Multimedia Subsystem (Subsistema Multimedia IP)

IP: Internet Protocol (Protocolo de Internet)

ISI: Interference Inter Symbol (Interferencia Intersimbólica)

LOS: Line of Sight (Visión Directa)

LTE: Long Term Evolution (Evolución a Largo Plazo)

M2M: Machine to Machine (Comunicación máquina a máquina)

MAC: Medium Access Control (Control de Acceso al Medio)

MBR: Registro de Arranque Maestro

MBMS: Multimedia Broadcast Multicast Service

MCCH: Multicast Control Channel (Canal de Control de Transporte Multicast)

MCH: Multicast Channel (Canal Multicast)

MIMO: Multiple Input Multiple Output (Múltiples Entradas y Múltiples Salidas)

MISO: Multiple Input Single Output (Múltiples Entradas y Una Salida)

MME: Mobility Management Entity

MMS: Servicios de Mensajes Multimedia

MS: Estaciones Móviles

MTCH: Multicast Traffic Channel (Canal de Tráfico Multicast)

NAS: Non Access Stratum

NFC: Near Field Communications (Comunicación de Campo Cercano)

NLOS: Non Line of Sight (Sin Visión Directa)

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiple (Multiplexación por División Ortogonal de Frecuencia)

OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access (Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales)

PAE: Puntos de Acceso de Servicio

PBCH: Physical Broadcast Channel (Canal Físico de Difusión)

PCC: Política y Control de Carga

PCCH: Paging Control Channel (Canal de Control Notificación)

PCFICH: Physical Control Format Indicator Channel (Canal Físico de Indicador del Formato de Control)

PCH: Paging Channel (Canal de Notificación)

PCRF: Policy Control and Charging Rules Function

PDCCH: Physical Downlink Control Channel (Canal físico de control del enlace descendente)

PDN: Public Data Network (Red Pública de Datos)

PDSCH: Physical Downlink Shared Channel (Canal físico compartido del enlace)

PGW: PDN Gateway

PHICH: Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (Canal Físico Indicador Híbrido ARQ)

PRACH: Physical Random Access Channel (Canal Físico de Acceso Aleatorio)

PRB: Physical Resource Block

PS: Packets Switched (Conmutación de Paquetes)

PUCCH: Physical Uplink Control Channel (Canal Físico de Control en el Enlace Ascendente)

PUSCH: Physical Uplink Shared Channel (Canal Físico Compartido en el Enlace Descendente)

QAM: Quadrature Amplitude Modulation (Modulación por Desplazamiento de Fase)

QoS: Quality of Service (Calidad de Servicio)

QCI: QoS Class Identifier (QoS Identificador de Clase)

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying (Modulación por Desplazamiento de Fase Cuaternaria)

RACH: Random Access Channel (Canal de acceso aleatorio)

RB: Resources Block (Bloque de Recursos)

RCCs: Empresas Radio Telefónicas

RF: Radio Frecuencia

RIELAC: Revista de Ingeniería Electrónica Automática y Comunicaciones

RLN: Rayleigh + Log-Normal

RRC: Plano de Control

RS: Estación Repetidora

Rx: Receptor

SAE: System Architecture Evolution (Evolución de la Arquitectura del Sistema)

SC-FDMA: Single Carrier Frequency Division Multiple Access (División de Portadora Simple de Acceso Múltiple)

SCTP: Stream Control Transmission Protocol (Protocolo de Comunicación de Capa de Transporte)

SGSN: Serving GPRS Support Nodo

SGW: Serving Gateway

SIMO: Single Input Multiple Output (Una Entrada y Múltiples Salidas)

SISO: Single Input Single Output (Una Entrada y Una Salida)

SK: Sakagami-Kuboi

SMS: Servicios de Mensajes Cortos

SON: Self Organizing Network

TDD: Time Division Duplex (Dúplex por División en Tiempo)

TDMA: Time Division Multiple Access (Multiplexación por División de Tiempo)

TIA: Telecommunications Industry Association (Asociación de la Industria de Telecomunicaciones)

TTI: Intervalo de Tiempo de Transmisión

Tx: Transmisor

UE: User Equipment (Equipo de Usuario)

UIT: Unión Internacional de Telecomunicaciones

UL: Uplink (Enlace ascendente)

UL-SCH: Up Link-Shared Channel (Canal compartido en el enlace ascendente)

UMTS: Universal Mobile Telecommunications Systems (Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles)

UTRAN: Universal Terrestrial Radio Access Network (Red de Acceso de Radio Terrestre Universal)

VPLMN: Visited Public Land Mobile Network

VoIP: Voice over IP (Voz sobre protocolo de Internet)

WAP: Wireless Application Protocol (Protocolo de aplicaciones inalámbricas)

WCCs: Empresas Telefónicas Alámbricas

INTRODUCCIÓN

En la actualidad de las telecomunicaciones, el área de las comunicaciones inalámbricas ha tenido un amplio desarrollo tanto en naciones del primer mundo, como en naciones menos desarrolladas.

Este desarrollo ha provocado un incremento de los servicios de telefonía y por lo tanto un incremento de los usuarios de los mismos.

En las comunicaciones inalámbricas la señal transmitida se ve afectada por diversos factores. Es por esto que es de vital importancia estudiar la forma de propagación de las señales con el fin de obtener una transmisión y recepción lo más óptima posible. Por este motivo en este trabajo se hace un estudio de los modelos de propagación, haciendo énfasis en el modelo de propagación COST 231 Walfisch-Ikegami para este fin se simuló en la herramienta Matlab el mismo.

Los factores que afectan la transmisión y recepción de la señal deben ser tomados en cuenta dependiendo del medio donde se está llevando a cabo la propagación.

Con la evolución acelerada de las tecnologías, surge una nueva generación denominada 4G (cuarta generación), que ofrece velocidades de transmisión más elevadas en comparación a las generaciones anteriores.

Las redes de cuarta generación contribuyen a cubrir en gran parte las necesidades de los usuarios ya que son redes más flexibles, facilitan la interconexión y la interoperabilidad entre tecnologías, ocupan menos espacio y sobre todo su facilidad de movilización.

El proyecto consta de 5 capítulos, los mismos que son detallados a continuación:

Capítulo I: El problema: Este capítulo permite conocer cómo se encuentra el despliegue de las redes LTE a nivel macro, meso y micro, los objetivos propuestos, así como la justificación y problemática para el desarrollo de este proyecto,

Capítulo II: Marco Teórico: Recopilación de información necesaria para el desarrollo del trabajo, relacionada con las redes LTE, modelos de propagación, comunicaciones

móviles, etc. Además se puede observar los antecedentes investigativos en los que se basa este trabajo.

Capítulo III: Metodología: En este capítulo se explica la modalidad que se utiliza para la investigación, se evidencia además las fuentes de información y se explica cómo se va a desarrollar el proyecto.

Capítulo IV: Desarrollo de la propuesta: Se presenta el desarrollo del diagrama de flujo, análisis de los parámetros para la simulación que se va a realizar en la interfaz gráfica de Matlab, pruebas de funcionamiento y análisis de resultados de la simulación.

Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones: En este capítulo se da a conocer los resultados obtenidos durante la investigación y se plantean recomendaciones que se puede tomar en cuenta para futuras investigaciones.

Para finalizar el proyecto se incluye la bibliografía.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Tema

“Simulación del modelo de propagación COST 231 Walfisch-Ikegami para el canal móvil de bandas 4G”.

1.2 Planteamiento del Problema

La impresionante demanda de banda ancha móvil experimentada en los últimos años, debido principalmente al elevado tráfico de datos generado por el uso masivo de dispositivos móviles, capaces de estar continuamente conectados a Internet, está forzando a la industria a desplegar redes de cuarta generación de alta capacidad basadas en el estándar LTE, con el que se busca mayores velocidades de transmisión y recepción mejorando los servicios. [1]

La red LTE en sus inicios prestó un servicio limitado geográficamente, era compatible sólo con determinados modelos de tablets y celulares que integran una antena LTE y un chip compatible con ésta. En el año 2012 esta tecnología está presente en grandes ciudades de algunos países de Norteamérica, Europa y Sudamérica. Los celulares y tablets que cuentan con esta tecnología tienen un valor un poco elevado lo que dificulta al momento de querer adquirirlos. [2] Desde el año 2014 LTE se abrió paso en el Ecuador a través de la Empresa Pública CNT y en la actualidad ya comienza a operar con Movistar y Claro.

El continuo crecimiento de las comunicaciones móviles ha generado la necesidad de buscar y obtener mayores coberturas y al mismo tiempo mejor calidad de servicio, para poder así generar diversos servicios a nivel global, es decir, desde cualquier sitio y en

cualquier momento. [3] Con la invención de teléfonos móviles avanzados con aplicaciones que permiten efectuar video llamadas, observar películas en alta definición provoca que la capacidad de enviar y recibir datos cada vez sea más amplia. El objetivo es contar con la red 4G no solo en las principales ciudades también ampliarla a otros sectores en los que, por el número de habitantes, las operadoras no tienen cobertura por la falta de rentabilidad, debido a que según cifras del Ministerio de Telecomunicaciones, en el Ecuador el número de abonados al Servicio Móvil Avanzado es de 17.900.000 millones. [4]

Sin embargo en la ciudad de Ambato, provincia de Tungurahua el servicio de los sistemas inalámbricos aún es deficiente debido a dos factores como son: la ubicación geográfica y perfil topográfico, provocando que las conexiones de llamadas y el uso de internet en dispositivos móviles sean aún limitadas en cuanto a velocidad de transmisión de datos se refiere. A pesar que se ha buscado ir mejorando el área de cobertura para ofrecer un mejor servicio, aún existe varias problemáticas como pérdida de señales a la hora de soportar la alta demanda de conexiones provocando así una mala conectividad [5].

1.3 Delimitación

Área Académica: Comunicaciones

Líneas de Investigación: Tecnologías de comunicación.

Sublínea de Investigación: Comunicaciones Inalámbricas.

Delimitación Espacial: El proyecto se realizó en la ciudad de Ambato.

Delimitación Temporal: El presente proyecto de investigación tuvo una duración de 6 meses, a partir de su aprobación por el Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, desde el 23 de Enero hasta el 23 de Julio de 2015.

1.4 Justificación

Debido al crecimiento de las comunicaciones móviles de los últimos años unidos al incremento de usuarios para adquirir servicios de datos y telefonía, a mayores velocidades se han conseguido avances muy importantes como la implementación de la tecnología LTE (4G).

LTE se extiende rápidamente y puede romper las barreras que aún impiden la adquisición plena de movilidad y la conectividad en diferentes zonas.

Este trabajo investigativo contribuye a entender el proceso paulatino de introducción de la tecnología LTE desde sus inicios, además muestra cómo ha evolucionado la misma.

La simulación del modelo de propagación para el canal móvil trata de facilitar el estudio y comportamiento del modelo COST 231 Walfisch-Ikegami en sus diferentes entornos utilizando las bandas pertenecientes a LTE con la variación de distintos parámetros en la simulación, lo cual permite predecir la pérdida por trayectoria de la señal y la viabilidad de proyectos en sectores donde el área de cobertura tiene una gran influencia en las comunicaciones móviles.

Después de analizar distintos tipos de modelos de propagación se consideró que es factible utilizar el modelo COST 231 WI ya que presenta menor pérdida de potencia en un enlace, además puede servir de base para otros modelos. Además permite obtener mejores resultados en entornos urbanos. Consideramos que esta aplicación puede contribuir al análisis por parte de los operadores de telefonía móvil y disminuir costos por ende generar ahorro, aumentar las áreas de cobertura y mejorar la calidad del servicio, además de estimar el impacto de las tecnologías que van hacer aplicadas.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

- Simular el canal móvil para bandas de 4G utilizando el modelo de propagación COST 231 Walfisch-Ikegami.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Analizar las características de las redes 4G (LTE).
- Clasificar los modelos de propagación utilizados en comunicaciones móviles.
- Analizar los modelos de desvanecimiento mediante diferentes distribuciones estadísticas.
- Analizar las ventajas de los sistemas de comunicaciones móviles con tecnología LTE.
- Realizar las pruebas de funcionamiento de la simulación

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes Investigativos

En el proyecto de fin de carrera a cargo de Hugo García de la Torre y de Gonzalo Herradón Berzal de la Universidad Politécnica de Madrid, basado en el estudio y desarrollo de sistemas de simulación para comunicaciones móviles, LTE, se evalúa las características ofrecidas por diferentes simuladores de comunicaciones móviles, analizando brevemente las características y funcionalidades de los simuladores correspondientes a LTE. [6]

En el proyecto realizado por Luis Alejandro Fernández Orquera previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional se hace un estudio y simulación del canal móvil para bandas de LTE con distribuciones Rician y Rayleigh con el modelo de propagación Okumura-Hata utilizando Matlab, se realiza una introducción de los aspectos fundamentales de la tecnología LTE, la compatibilidad con las tecnologías antecesoras y sus principales funciones. Se describen además las generalidades del canal inalámbrico, sus efectos de desvanecimiento en especial las distribuciones de Rician y Rayleigh, y se detalla el modelo de propagación Okumura-Hata para los diferentes ambientes. [7]

La revista RIELAC Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones, Vol.XXXIV 1/2013 en Cuba, realiza un estudio comparativo de los modelos de propagación de canal inalámbrico a cargo de Reinier Alonso Quintana, Raikel Bordón López y Samuel Montejo Sánchez en el que plantean que los modelos de propagación del canal inalámbrico resultan de gran importancia en el diseño de redes y sistemas, dada su gran diversidad, es necesario determinar los modelos más eficaces para cada entorno. En este artículo se evalúa el

desempeño de una selección de modelos de propagación en ambientes urbanos y suburbanos. Se determina el impacto de la altura de la estación base sobre las predicciones de los modelos, destacándose la sensibilidad de aquellos que incluyen información detallada del entorno en su formulación. Finalmente, son comparadas las predicciones de los modelos evaluados con mediciones reales, resultando el Hata y el Walfisch-Ikegami como los modelos más precisos para su aplicabilidad en estos entornos. [8]

2.2 Fundamentación Teórica

2.2.1 Introducción a los Sistemas de Telefonía Móvil Celular

Los últimos años han visto un espectacular crecimiento de los mercados de telecomunicaciones móviles, principalmente en su aplicación de telefonía celular, siendo el segmento de mercado de servicios de telecomunicaciones el de mayor crecimiento actual y potencial. [9]

En los sistemas celulares de radiotelefonía móvil, el área en la que ha de prestarse servicio se divide en zonas de menor tamaño, llamadas celdas en la medida que el número de suscriptores se incrementa, el tamaño de las celdas se redefine, haciéndose más pequeño e incrementándose el número total de celdas. En cada celda sólo puede usar un grupo de canales del total disponible. Para celdas que están suficientemente separadas, se puede utilizar el mismo grupo de canales.

Un móvil que se sirve para este tipo de sistemas puede trasladarse en un área de servicio, pudiendo salir del área de cobertura de la estación base de la celda en que se encuentre. Debido a esto, es necesario que el móvil sea atendido ahora por la estación base de la celda a la que esté pasando. A este proceso se le conoce como transferencia de llamada y es una de las características principales en los sistemas de radio celular. Aunque un mayor reúso de frecuencias y la subdivisión de celdas permiten un uso más eficiente del espectro, también tiende a incrementar el número de transferencia de llamada.

A principios de los ochenta entraron en operación los primeros sistemas de telefonía móvil celular (primera generación), con la característica notoria que utilizan esquemas de modulación analógicos para transmitir los canales de voz. [10]

Los sistemas de comunicaciones móviles celulares son, en términos generales, aquellos capaces de proporcionar servicios de telecomunicación sobre zonas geográficas extensas

y con capacidad para mantener la continuidad de las comunicaciones mientras el usuario se va desplegando. Lógicamente, para que esto sea posible debe desplegarse una red siguiendo una cierta arquitectura e incorporando una serie de funcionalidades y procedimientos. El número, ubicación y configuración de estas estaciones base debe ser suficiente para proporcionar el servicio deseado en las zonas deseadas, la calidad deseada en las comunicaciones y la capacidad suficiente para el número de clientes que tenga el operador de red. Hay una gran diversidad de estándares de sistemas de comunicaciones móviles celulares en todo el mundo, basados en distintas tecnologías y con distintas capacidades.

Generalmente los sistemas suelen clasificar, en función de sus capacidades en generaciones: primera generación (1G), básicamente marcada por ser analógica; segunda generación (2G), con tecnología digital y para soportar fundamentalmente voz, y tercera generación (3G), de banda ancha para soportar servicios multimedia. La complejidad de la transmisión entre redes móviles orientadas a voz y redes móviles orientadas a multimedia, y la convergencia con Internet, ha ocasionado la aparición de una generación intermedia, conocida como 2.5G. Seguidamente se describen los principales aspectos de los representantes 2G, 2.5G y 3G, desde la perspectiva europea. [11]

Cabe preguntarse cuál puede ser el interés de la industria en realizar nuevas inversiones en infraestructura de red de acceso y de conmutación, o para qué necesita el sector de las comunicaciones un nuevo estándar de acceso celular.

La respuesta hay que buscarla en las características particulares de este mercado, con tendencias muy cambiantes pero siempre con expectativas crecientes por parte de los usuarios y con previsiones ciertas de saturación en la capacidad global de servicios de datos en muy pocos años. Por comparación con lo que sucede en redes fijas, la experiencia de usuario, es decir, la calidad subjetiva que percibe en el servicio de banda ancha, es muy alta gracias a los varios megabits por segundo que puede conseguir en una conexión Digital Subscriber Line (DSL) y a precios cada vez más competitivo. A diferencia de lo que sucedía años atrás, el crecimiento del negocio de telefonía móvil no se corresponde tanto al incremento de abonados, sino con el aumento del tráfico, en cuanto a cantidad de minutos de voz y sobre todo de megabytes de datos transferidos así como en la renovación de equipos y contratos para migrar a tecnologías de banda ancha móvil. La aparición de

terminales tipo smartphone junto con la proliferación de dispositivos portátiles con conectividad de datos Tercera Generación Móvil (3G) continúa disparando la demanda de capacidad de transmisión de datos en movilidad. Según estudios recientes, la progresión que se puede prever del consumo demandado por los usuarios no podrá ser cubierta completamente o con suficiente calidad por las redes actuales ni por las evoluciones de 3G, como High Speed Packet Access Evolution (HSPA+).

Al observar la evolución reciente de los abonados de banda ancha móvil se puede ver cómo a partir de 2007 se ha producido un incremento muy significativo en su número y en la demanda de tráfico de servicios de banda ancha. En muchos países de los mercados más desarrollados el consumo de datos en movilidad se ha multiplicado entre 2008 y 2010 y sigue creciendo exponencialmente. Basta con comprobar cómo a principios de 2008 el número global de abonados a HSDPA era de unos 20 millones, a mediados del 2009 alcanzó los 150 millones, a pesar de lo cual aún corresponde a poco más del 10% del total de usuarios de GSM y UMTS, por lo que cabe esperar que en 2012 se alcancen los 1000 millones de abonados de banda ancha móvil, repartidos entre tecnologías 3G y LTE.

El despliegue de la tecnología LTE, en nuevas bandas de frecuencia o en parte de las actuales bandas por 2G, parece la solución más viable, eficiente y rentable a medio y largo plazo.

Cabe destacar que en acusado incremento del tráfico como el que se ha previsto no trae consigo un incremento proporcional de los ingresos. Esto es debido a la proliferación y generación del consumo de datos en movilidad incrementa la competencia entre operadoras y la exigencia de los usuarios de seguir recibiendo cada vez más ancho de banda con menores tarifas.

LTE aparece en la escena actual como una oportunidad de cubrir esa creciente demanda de tráfico de datos, con inversiones que se pueden rentabilizar. [12]

Los sistemas celulares pueden clasificarse en analógicos y digitales. Dentro de cada clasificación existen diferentes normas de transmisión que definen las bandas de frecuencias utilizadas (bandas de 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz, etc.), los métodos de acceso múltiple a emplear (FDMA, TDMA, CDMA), las formas de modulación (FM, nQAM, etc.).

El sistema celular analógico más extendido es el denominado Advanced Mobile Phone System (AMPS), originado en los EUA. Entre los sistemas digitales puede citarse el Digital AMPS (DAMPS, también conocido como TDMA), originario de EUA como evolución del AMPS.

La norma celular más extendida en el mundo corresponde al sistema digital conocido como Global System for Mobile Communications o Sistema Global de Comunicaciones Móviles (GSM), originario de Europa y adoptado en los países de la Comunidad Económica Europea. Por las ventajas tecnológicas y facilidades de servicio que brinda, su empleo se ha difundido mundialmente. [13]

2.2.2 Conceptos Básicos

Durante la década de los setenta, la integración a gran escala de dispositivos electrónicos y el desarrollo de los microprocesadores abrió las puertas a la implementación de sistemas complejos. Dado que el área de cobertura de una antena está fundamentalmente limitada por su potencia de transmisión y rango de frecuencias emitidas a menor frecuencia, mayor alcance, los sistemas se plantearon con varias estaciones receptoras para una única estación transmisora. Se permitía así la cobertura de un área mayor a costa de una mayor complejidad en la infraestructura. Pero la verdadera revolución se produjo con los sistemas celulares, donde hay numerosos emplazamientos que tanto transmiten como reciben, permitiendo la reutilización de las frecuencias asignadas al operador.

En lugar de intentar incrementar la potencia de transmisión, los sistemas celulares se basan en el concepto de reutilización de frecuencias: la misma frecuencia se utiliza en diversos emplazamientos que están suficientemente alejados entre sí, lo que da como resultado una gran ganancia en capacidad.

Por contra, el sistema es mucho más complejo, que deben ser capaces de seleccionar una estación entre varias posibilidades. Además, el coste de infraestructura aumenta considerablemente debido a la multiplicidad de emplazamientos.

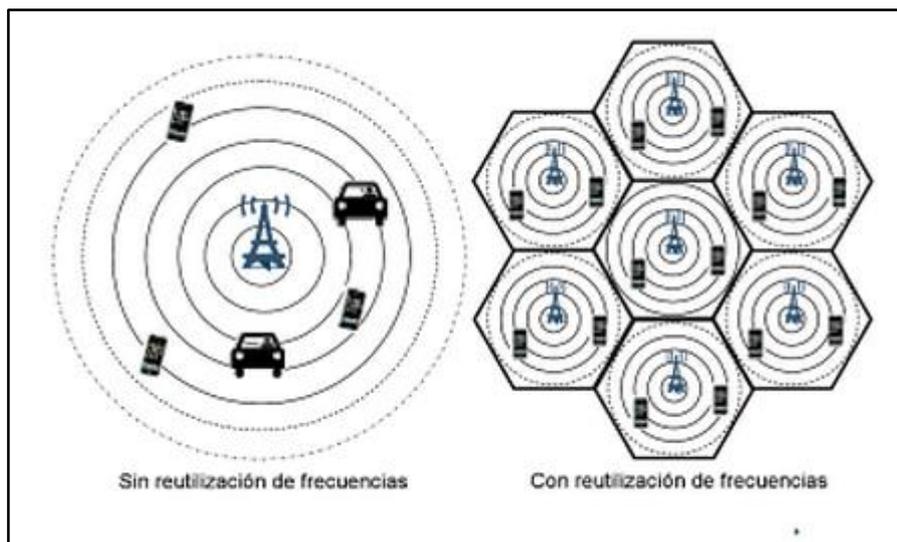


Fig.2. 1: Estructura de células hexagonales

Fuente: Radiocomunicaciones: viajando a través de las ondas [14]

Célula o celda

Una célula es cada una de las unidades básicas de cobertura en que se divide un sistema celular. Cada célula contiene un transmisor, que puede estar en el centro de la célula si las antenas utilizadas son o utilizan un modelo de radiación omnidireccional, o en un vértice de la misma, si las antenas tienen un diagrama directivo, y transmiten un subconjunto del total de canales disponibles para la red celular a instalar.

Como el alcance de cada estación base se circunscribe solamente al área de influencia de la antena, a medida que nos alejamos de ésta y nos acercamos al límite de su alcance, la señal comienza a debilitarse y automáticamente la comunicación telefónica se transfiere a la estación siguiente, proceso que se conoce como “traspaso” o “roaming”. Todo ese proceso lo controla una estación de conmutación de telefonía celular (BSC) que permite que la comunicación se mantenga en todo momento sin cortarse durante todo el tiempo que dure la conversación.

Cobertura

Se entiende por cobertura la zona desde la cual un terminal móvil puede comunicarse con las estaciones base y viceversa. Teóricamente son hexágonos regulares o celda, pero en la práctica, toman muy distintas formas, debido a la presencia de obstáculos, a la orografía cambiante de la celda y a las características de propagación de las antenas radiantes.

Lo que diferencia a un sistema celular frente a cualquier otro sistema que tenga la radio como medio de transmisión es que, en zonas de alta densidad de tráfico es capaz de utilizar más eficientemente el limitado espectro radioeléctrico que tiene asignado. Esto implica un diseño de red denominado “celular”, que es o que le da el nombre al sistema, consistente en dividir el área a cubrir en un número de células suficientemente grande, que permita la reutilización de frecuencias.

Reutilización de frecuencias

Se trata de tomar todo el grupo de frecuencias asignado a la red y, dividiendo el grupo en varios subgrupos células o “cells” y ordenándolo según una estructura celular racimo o “cluster” se puede hacer una reasignación de las mismas e incluso dividir las células en otras más pequeñas para poder atender a un mayor número de ellos.

Señalización

Por señalización se entiende toda comunicación dedicada a gestionar los recursos del sistema para permitir la comunicación. En las comunicaciones celulares se trata de forma diferente la señalización asociada a la transmisión de radio y la relativa a la propiedad estructura de red.

Handover

Es como se denomina al proceso de pasar una comunicación establecida en un mismo móvil de un canal a otro, sin que los usuarios lo perciban. En función de la relación entre los canales origen y destino de la comunicación, los trasposos pueden clasificarse en: duro y blando o inter/intra célula.

Roaming

Este concepto está comúnmente asociado al registro de un móvil en una red distinta de la propia, lo que sucede cuando se viaja al extranjero y, mediante acuerdos entre operadores se puede seguir disfrutando del servicio. [14]

Composición de un Sistema de Radiocomunicaciones Móviles

Todo sistema de radiocomunicaciones móviles consta de los siguientes elementos:

- Estaciones fijas (FS)

- Estaciones móviles (MS)
- Equipos de control

Estaciones Fijas.- Una estación fija es una estación radioeléctrica no prevista para su utilización en movimiento. Hay diversas categorías de estaciones fijas en el servicio móvil:

- Estación de base (BS).
- Estación de control (CS).
- Estación repetidora (RS).

Estación Base.- Una estación base es una estación radioeléctrica fija cuyo funcionamiento se controla directamente desde una unidad de control puede ser local o remoto, mediante líneas telefónicas o radioenlaces.

Las estaciones de base tienen como característica primordial el de ser fuentes y destinatarias de tráfico, tanto de información como de señalización.

Están constituidas por equipos transceptores, sistemas radiantes y elementos de conexión entre unos y otros.

Estación de control.- Una estación de control es una estación fija cuyas transmisiones se utilizan para gobernar automáticamente el funcionamiento de otra estación de radio en un emplazamiento específico. Se emplean generalmente para telemandar una estación de base o una repetidora.

Estaciones repetidoras.- Son estaciones fijas que retransmiten las señales recibidas.

Se emplean para conseguir una gran cobertura radioeléctrica, por lo que se suelen ubicar en lugares altos. También se usan para el relleno de zonas de sombra en la cobertura de una estación base o para proporcionar cobertura en escenarios difíciles tales como túneles, estacionamientos subterráneos, etc.

Estaciones Móviles.- Una estación móvil es una estación radioeléctrica del servicio móvil prevista para su utilización en un vehículo en marcha o que efectúa paradas en puntos indeterminados. El término incluye a los equipos portátiles o de mano, que son aquellos que acompañan al usuario, y a los denominados equipos transportables, que

pueden instalarse temporalmente en vehículos (coches o motocicletas) y llevarse también a mano.

Equipos de control.- En los sistemas de comunicaciones móviles, en general, el conjunto de equipos de control lo forman los dispositivos necesarios para el gobierno de las estaciones de base, la generación y recepción de llamadas, localización e identificación de usuarios, de vehículos, transferencia de llamadas a red telefónica, señalización de canales, etc. En las comunicaciones móviles de datos incluyen aquí los terminales de datos (pantallas, impresoras), miniordenadores y controladores. [15]

2.2.3 Evolución de la Telefonía Móvil Celular

Las distintas necesidades y avances dieron lugar a generaciones tecnológicas bien diferenciadas que se comentan a continuación. En dicha evolución se aprecia cómo se van cumpliendo las necesidades del mercado para tener acceso múltiple al canal de comunicación, así como la necesaria migración de los sistemas analógicos a sistema digital con el fin de permitir mayor volumen de usuarios y ofrecer los niveles de seguridad que se demandaban.

Antecedentes

OG representa a la telefonía móvil previa a la era celular. Estos teléfonos móviles eran usualmente colocados en autos o camiones, aunque modelos en portafolios también eran realizados. Por lo general, el transmisor (Transmisor-Receptor) era montado en la parte trasera del vehículo y unido al resto del equipo (el dial y el tubo) colocado cerca del asiento del conductor.

Eran vendidos a través de WCCs (Empresas Telefónicas Alámbricas), RCCs (Empresas Radio Telefónicas), y proveedores de servicios de radio doble vía. El mercado estaba compuesto principalmente por constructores, celebridades, etc.

Esta tecnología, conocida como Autoradiopuhelin (ARP), fue lanzada en 1971 en Finlandia; conocida ahora como el país con la primera red comercial de telefonía móvil. [16]

Primera Generación (1G)

Los sistemas móviles de primera generación (1G) se caracterizaron por realizar transmisiones de tipo analógico de servicios de voz con niveles de baja calidad, utilizando para su funcionamiento la técnica FDMA o Acceso Múltiple por División de Frecuencia, lo que hacía a estos sistemas limitados en relación al número de usuarios a los que podía dar servicio. La seguridad no existía en estos sistemas. La tecnología predominante de esta generación es AMPS (Advanced Mobile Phone System) desarrollada por los laboratorios Bell.

Segunda Generación (2G)

La segunda generación se caracteriza especialmente por ser digital, lo que trajo consigo la reducción de tamaño, costo y consumo de potencia en los dispositivos móviles, además de transmitir voz y datos digitales de volúmenes bajos, por ejemplo, mensajes de texto (SMS Servicio de mensajes cortos) o mensajes multimedia (MMS Servicio de mensajes multimedia), identificador de llamadas, conferencia compartida, entre otros.

Con los sistemas de telefonía celular de segunda generación se logró incrementar las velocidades de transmisión de información. Adicionalmente, con los sistemas 2G se logró avances significativos en cuanto a seguridad, calidad de voz y de roaming.

Dentro de la segunda generación de celulares puede destacar los sistemas TDMA, GSM y CDMA.

TDMA: La multiplexación por división de tiempo es una técnica que permite la transmisión de señales digitales y cuya idea consiste en ocupar un canal de transmisión a partir de distintas fuentes, de esta manera se logra un mejor aprovechamiento del medio de transmisión.

GSM: Sistema Global para las Telecomunicaciones Móviles. El Group Special Mobile fue el organismo que se encargó de la configuración técnica de una norma de transmisión y recepción para la telefonía europea. El estándar GSM fue desarrollado a partir de 1982, pero no fue hasta 1992 que las primeras redes europeas de GSM-900 iniciaron su actividad, y el mismo año fueron introducidos al mercado los primeros teléfonos celulares GSM, siendo el primero el Nokia 1011 en noviembre de ese año.

Los sistemas de segunda generación GSM emplean una combinación de las técnicas de acceso múltiple FDMA y TDMA.

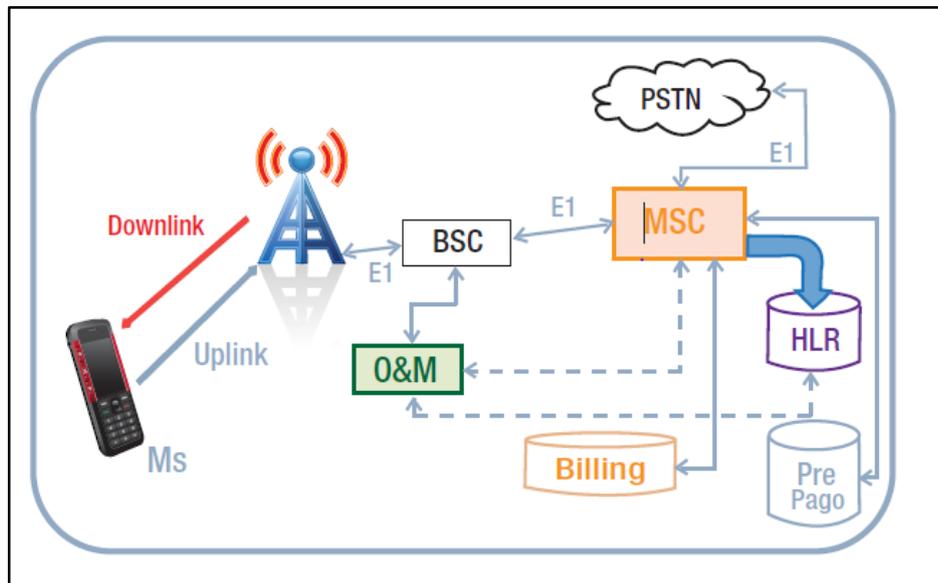


Fig.2. 2: Estructura de la Red GSM
Fuente: Revista de la Supertel 2012 [17]

CDMA: En el año 1992 la compañía Qualcomm desarrolló un sistema celular basado en la técnica de acceso múltiple CDMA, para posteriormente, en el año de 1993 ser modificado y adoptado por la TIA bajo el nombre IS-95, conocido también como CDMA One. En 1995 finalmente se realizó el lanzamiento del primer sistema comercial basado en esta tecnología en Hong Kong por parte del operador Hutchison Telecom.

GPRS (2.5G)

La generación 2.5G corresponde a mejoras tecnológicas en las redes 2G, las cuales se mencionan a continuación: HSCSD mejora el mecanismo de transmisión de datos.

GPRS transmisión por paquetes se puede utilizar servicios WAP. EDGE es una evolución de GPRS Todas estas modificaciones con tendencia a entregar capacidades 3G con una velocidad que puede llegar hasta los 384 kbps, ya adecuada para muchas aplicaciones en la transferencia de datos.

Tercera Generación (3G)

Está basada en la familia de estándares de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) establecido en la IMT-2000.

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) constituye uno de los miembros de esta familia de estándares IMT-2000.

Entre los atributos de UMTS se puede destacar: conectividad virtual a la red todo el tiempo, diferentes formas de tarificación, ancho de banda asimétrico en el enlace ascendente y descendente, configuración de la calidad de servicio (QoS), integración de la tecnología y estándares de redes fijas y móviles, entorno de servicios personalizado, y muchos otros.[17]

Generación 3.5 (Evolución a la Cuarta Generación)

Esta fase es la evolución de la tercera generación de telefonía móvil, considerada además como antesala de la cuarta generación y la que da lugar a la tan ansiada convergencia de redes. Esta generación intermedia incrementa la eficiencia espectral comparada con la generación 3G y utiliza su máximo potencial en la prestación de servicios de banda ancha. Ofrece tasas de transferencia de datos muy alta pudiendo llegar hasta 14 Mbps y por tanto ya puede brindar servicios multimedia sobre las redes celulares como: videoconferencias, videollamadas, video streaming, video portal, etc. [18]

Cuarta Generación (4G)

4G son las siglas de la cuarta generación de tecnologías de telefonía móvil. La 4G no es una tecnología o estándar definido, sino una colección de tecnologías y protocolos para permitir el máximo rendimiento de procesamiento con la red inalámbrica más barata. Al día de hoy no hay ninguna definición de la 4G, pero podemos resumir en qué consistirá en base a lo ya establecido. La 4G estará basada totalmente en IP siendo un sistema de sistemas y una red de redes, alcanzándose después de la convergencia entre las redes de cables e inalámbricas así como en computadores, dispositivos eléctricos y en tecnologías de la información, tales como con otras convergencias para proveer velocidades de acceso entre 100 Mbps en movimiento y 1 Gbps en reposo. [19]

2.2.4 Estándar LTE. Introducción

LTE (Long Term Evolution) es una tecnología de plataforma radio totalmente nueva, cuyas especificaciones tecnológicas han sido aprobadas recientemente por el 3GPP.

LTE utiliza Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) en el downlink, lo que es apropiado para lograr altos picos de velocidades de datos en ancho de banda de alto espectro, LTE es parte de la evolución de GSM más allá de la 3G.

Del mismo modo que la 3G coexiste con sistemas de Segunda Generación (2G) en redes integradas, los sistemas LTE coexistirán con sistemas 3G además de sistemas 2G. Los dispositivos multimodo funcionarán con todas las variantes de LTE/3G o aún de LTE/3G/2G, dependiendo de las circunstancias del mercado.

LTE no solo tendrá la capacidad de operar en una serie de bandas de frecuencia diferentes, sino que también permite un ancho de banda escalable. Mientras que UMTS/HSPA utiliza canales mixtos de 5MHz, la cantidad de ancho de banda es un sistema LTE se puede escalar desde 1,25 a 20 MHz. Esto significa que se pueden lanzar redes con poca cantidad de espectro, junto con servicios existentes, y agregar más espectro a medida que los usuarios se pasen de sistema. Esto permitirá a los operadores adaptar sus estrategias de implantación de redes para ajustarse a sus recursos de espectros disponibles, sin tener que preocupar que su espectro se adapte a una tecnología en particular, lo que redundará en una mayor flexibilidad de despliegue y en menor coste de inversiones a cometer.

Para los usuarios, su principal ventaja será la velocidad que se consigue, similar a la de las redes fijas actuales, por lo que puede ser una opción muy buena, siempre y cuando su precio sea competitivo. Su principal aplicación será en las ciudades y para dar acceso de banda ancha en las zonas rurales, pero, eso sí, aún tardará algún tiempo en implantarse, ya que los operadores no tienen mucha prisa, puesto que aún tienen que amortizar sus redes de 3G y es necesario que las diferentes administraciones públicas asignen las frecuencias correspondientes. [20]

2.2.5 Arquitectura de los Sistemas LTE

La arquitectura de una red LTE es estructuralmente mucho más simple que, por ejemplo, la de una red GSM o UMTS, aunque también tiene su complejidad, como se puede ver en la figura 2.3, en la que se muestra la arquitectura completa de una red LTE, con su parte de acceso (E-UTRAN) y su parte de core (EPC, Evolved Packet Core), o su sinónimo (SAE, System Architecture Evolution), que logra interconectar diversas redes

de acceso, que en algunas ocasiones pueden ser heterogéneas entre ellas. Por lo tanto, podemos tener redes de acceso 3GPP y no-3GPP:

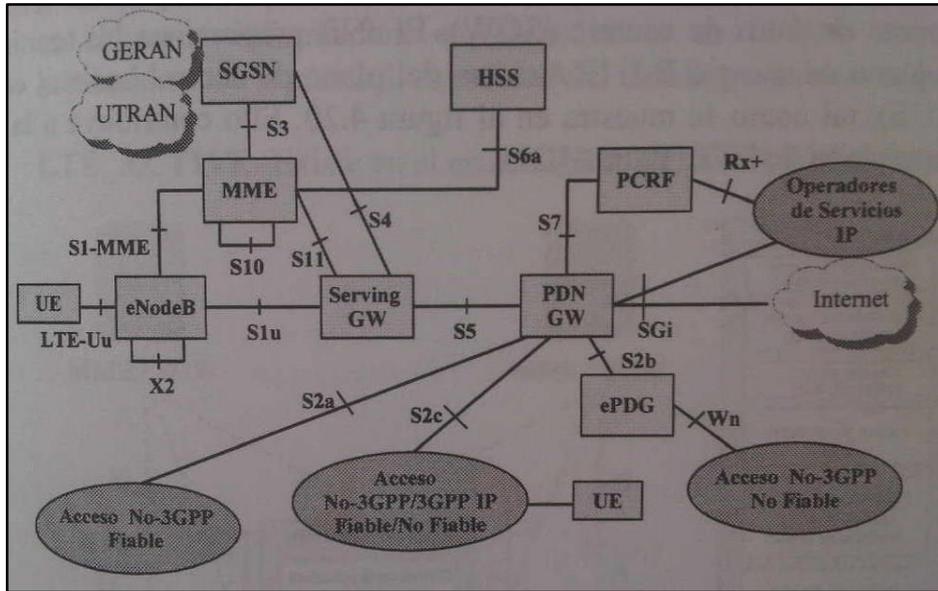


Fig.2. 3: Arquitectura de una red LTE

Fuente: Comunicaciones Móviles, Sistemas GSM, UMTS y LTE [21]

Red de acceso: E-UTRAN

Esta arquitectura se basa en el dominio de conmutación de paquetes (PS), y se asume que los servicios de tiempo real (voz y vídeo) se ofrecen sobre este dominio.

Los aspectos más importantes relacionados con la evolución de la red son los siguientes:

- Soporte de una variedad de redes de acceso (por ejemplo E-UTRAN) y la selección de la red de acceso basado en las políticas de operador, preferencias del usuario, y las condiciones de la red de acceso.
- Mantenimiento de la calidad de servicio negociada a lo largo de todo el sistema, en particular entre dominios y entre redes, y calidad de servicio en el enlace radio.
- Soporte a la movilidad radio, entre dominios y entre redes.

En LTE la red de acceso está formada por un único nodo llamado eNodo B. Este nodo está conectado con otros eNodo B, así como con el núcleo (core) de LTE, tanto para la parte de señalización (MME) como de datos de usuarios (SGW). El eNB proporciona las terminaciones tanto del plano de usuarios E-UTRA como del plano de control hacia el

equipo de usuario (UE), tal como se muestra en la figura 2.4. Ello contribuye a la llamada arquitectura plana de LTE figura 2.5.

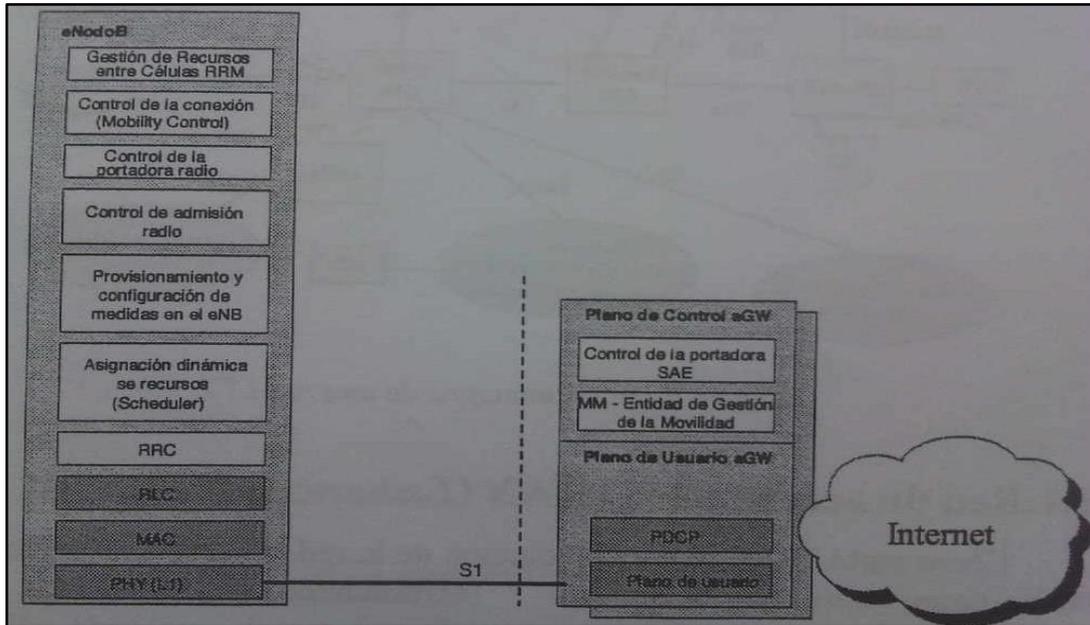


Fig.2. 4: Distribución de funciones en la E-UTRAN (eNB/EPC)

Fuente: Comunicaciones Móviles, Sistemas GSM, UMTS y LTE [21]

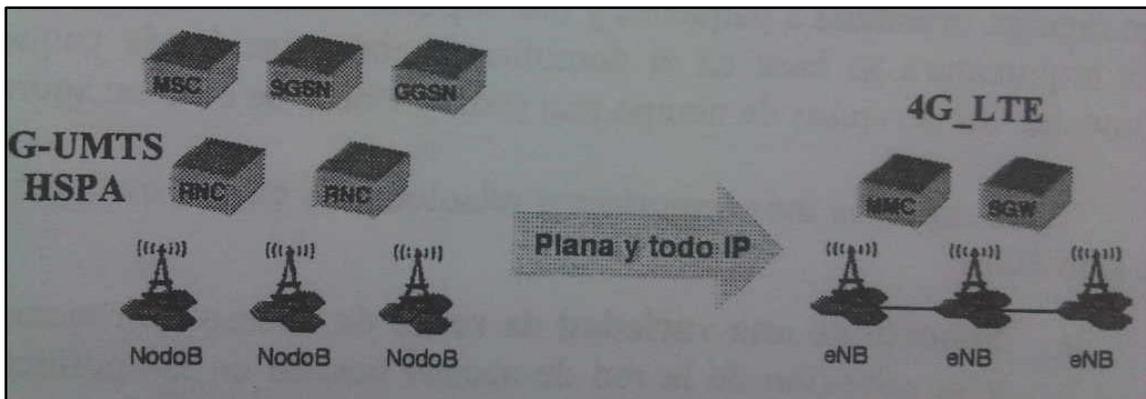


Fig.2. 5: Arquitectura plana de LTE

Fuente: Comunicaciones Móviles, Sistemas GSM, UMTS y LTE [21]

Así, pues, E-UTRAN consta de varios eNB, proporcionando el plano de usuarios E-UTRAN (PDCP/RLC/MAC/PHY) y el plano de control (RRC). Los estados de movilidad general EPC/ SAE utilizan los siguientes estados:

- LTE_DETACHED: no existe un contexto/ entidad RRC.

- LTE_IDLE. Existe en el estado RRC_IDLE (disponible). En este estado se almacena información en el móvil, portadoras radio, etc.
- LTE_ACTIVE: existe en el estado RRC_CONNECTED (conectado).

Una nueva interfaz, llamada X2, conecta los eNB como una red mallada (mesh), lo que permite la comunicación directa entre elementos para el intercambio de información y señalización, y facilita el handover de las llamadas entre ellos. El E-UTRAN está conectado al EPC (core de LTE) a través de la interfaz S1, que conecta a los eNB a dos elementos: la entidad de gestión de la movilidad (MME) y el Gateway servidor (SGW) a través de una relación de “muchos-a-muchos”, como se puede apreciar en la figura 2.6, que muestra en detalle la arquitectura de la red de acceso (E-UTRAN) en LTE.

Evolved NodeB

El eNodo es la evolución del Nodo B de UMTS para soportar las funcionalidades de LTE. Se puede decir que esta evolución se realiza sobre HSPA.

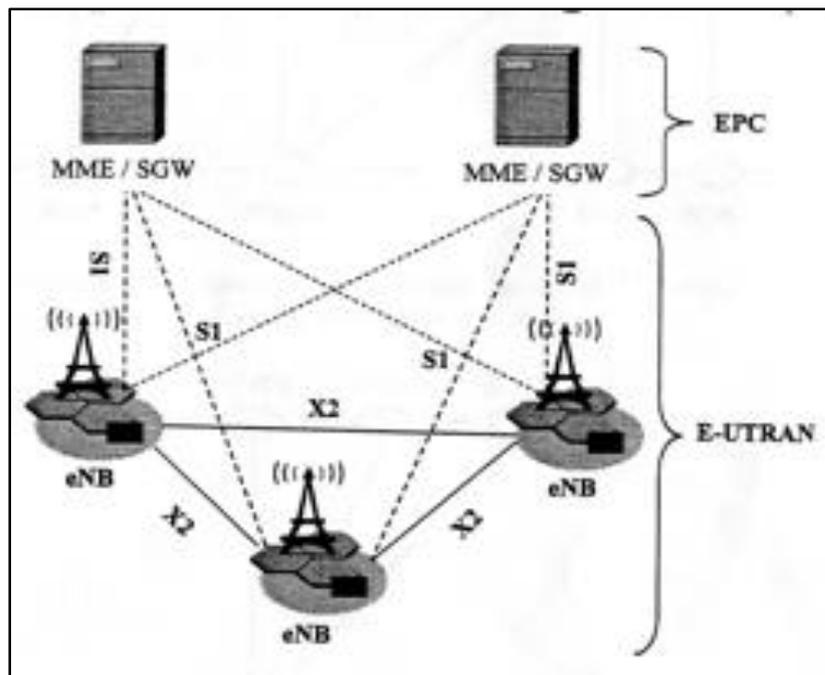


Fig.2. 6: Arquitectura E-UTRAN (RAN en LTE)
Fuente: Comunicaciones Móviles, Sistemas GSM, UMTS y LTE [21]

En concreto, el eNB alberga las siguientes funciones:

EPC sería como el equivalente de las redes GPRS, vía los subcomponentes MME, SGW y PGW.

La arquitectura EPC/SAE sigue los mismos parámetros de diseño de las redes 3GPP antecesoras, sin embargo divide las funciones del Gateway de control (SGSN en UMTS) en un plano de control comandado por el MME y un plano de usuario liderado por el SGW, lo que implica una arquitectura optimizada para el plano de usuarios, incluyendo una reducción en el número de elementos de red que son atravesados por los paquetes de datos. Las funciones originales del GGSN son implementadas por el PDN Gateway (PGW). Se basa en los siguientes principios fundamentales:

- El uso de protocolos basados en IP en todas las interfaces entre los elementos de la red.
- La separación entre un plano de control y un plano del usuario.
- Un punto de anclaje (anchor) común, conocido como PGW para varias versiones de tecnologías acceso definidas por el 3GPP
- Capacidad para asignar direcciones IP independientes y otros atributos.
- La puerta de enlace SGW es el punto de anclaje que conecta el eNodo B a la red principal.
- Las políticas de facturación y normas de calidad de servicio (PCRF) completan el marco normativo.

Entidades

MME: Obtiene datos del usuario a través de la información almacenada en el HSS. El MME autentica, autoriza y selecciona la red de datos externa (PDN) apropiada para establecer el enlace entre el E-UTRAN a las redes o servicios externos. El MME proporciona conectividad entre el Nodo B y la red GWM/UMTS existente a través del SGSN. También realiza funciones de administración de movilidad y recolecta información de facturación.

SGW: Es un equipo del plano de usuario que es controlado por el MME. También es un punto de monitoreo de las políticas de conexión y servicio establecidas en el PCRF.

PWG: Puede ser comparado con las funciones realizadas por el GGSN pero además tiene un importante papel en el control de la movilidad. Asigna la dirección IP al UE.

HSS: Almacena y administra datos relativos a la suscripción de los usuarios.

PCRF: Realiza funciones de control de políticas y reglas de facturación.

2.2.6 Interfaces

Todos los eNodo B se conectan al menos a un MME a través de la interfaz lógica S1-MME (plano de control). El MME se basa en los datos de suscripción de los usuarios que intentan tener conectividad, por esto, se conecta al HSS a través de la interfaz S6a. Por su parte, el SWG se interconecta a los eNodo B a través de la interfaz S1-U (plano de usuario), mientras que el SWG y el PGW usan la interfaz S5 (si el usuario no está en roaming) o S8 (si el usuario se encuentra en una red visitante, es decir roaming) para conectarse entre sí.

En la figura 2.8 se muestra el diagrama de alto nivel de LTE RAN y el EPC, y cómo estos interactúan con tecnologías tradicionales de acceso por radio, además de las interfaces entre los distintos elementos de la red.

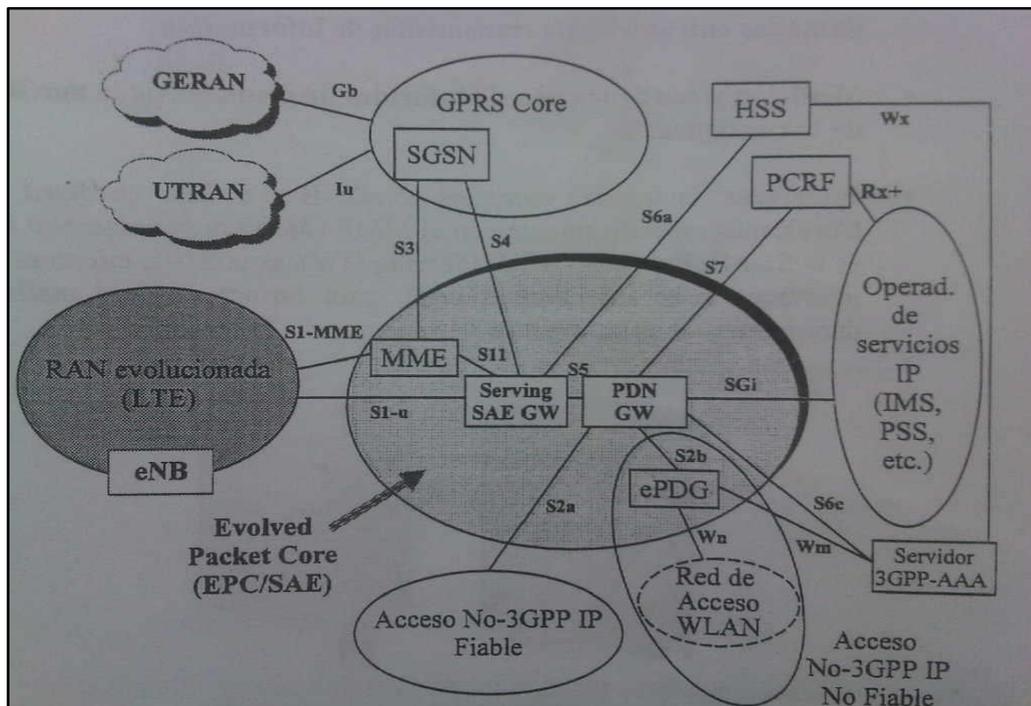


Fig.2. 8: Arquitectura RAN y Core del Sistema LTE

Fuente: Comunicaciones Móviles, Sistemas GSM, UMTS y LTE [21]

La señalización del plano de control entre MME y el SGW se realiza usando la interfaz S11, que es una de las interfaces más importantes dentro de la arquitectura, pues, entre

otras cosas, se usa para establecer la conexión IP de los usuarios LTE a través de la interconexión de Gateway y estaciones base, y además brinda soporte para movilidad cuando los usuarios se mueven entre los diferentes eNodo B. En la arquitectura también se definen dos nuevas interfaces: la S7, responsable de la interconexión entre el PCRF y el PGW, y la interfaz S10, que como se ha mostrado en la figura 2.3, conecta varios MME.

A continuación se presentan las principales características de cada interfaz.

S1-MME: Es el punto de referencia para el plano de control entre el E-UTRAN y el MME.

S1-U: Punto de referencia para el plano de control entre E-UTRAN y el SGW.

S2: Esta interfaz permite conectar el PGW a otras redes IP no – 3GPP, tanto fiables (trusted) como no fiables (untrusted).

S3: Esta interfaz habilita al usuario y permite el intercambio de información entre redes 3GPP y LTE/SAE.

S4: Esta interfaz controla y soporta la movilidad entre las redes 3GPP y LTE/SAE. Adicionalmente, si no hay direct túnel, esta interfaz suministra el tunneling del plano de usuario de la red.

S5: Interconecta el SGW con el PGW y, además, hace tunneling de los datos del plano de usuario entre estas dos interfaces. También se usa en la relocalización de los SGW dada la movilidad del UE.

S6a: Permite la transferencia de información de los usuarios (contenida en el HSS) y su autenticación/autorización al EPS (Evolved Packet System) o conjunto de E-UTRAN + EPC.

S7: Soporta la transferencia de políticas de QoS y reglas de cobro desde el PCRF al PCEF en el PGW.

S8: Punto de referencia inter-PLMN que suministra los planos de control y de usuario entre el SGW en la red visitante y la red local (VPLMN y HPLMN respectivamente).

S9: Soporta la transferencia de políticas de QoS y control de cobro entre el Home PCRF y el Visited PCRF.

S10: Punto de referencia entre MME.

S11: Punto de referencia para la conexión entre MME y SGW.

S12: Punto de referencia entre UTRAN y SGW Para formar el tunneling del plano de usuario entre UTRAN y SGW cuando se establece la función de direct túnel.

S13: Permite la interconexión entre el MME y el EIR.

SGi: Es el punto de referencia entre el PGW y la PDN, por ejemplo, internet.

Rx: Esta interfaz permite conectar el PCRF a otras redes de operadoras de servicios IP.

UU (Interfaz Radio LTE)

Es la interfaz física de radio, que conecta el terminal (UE) con la estación base de LTE (eNode B). Está basada en OFDMA en el enlace descendente y SC-FDMA en el enlace ascendente, soportando tanto el modo FDD como el TDD.

Para estos dos modos se han definido diferentes estructuras de trama radio.

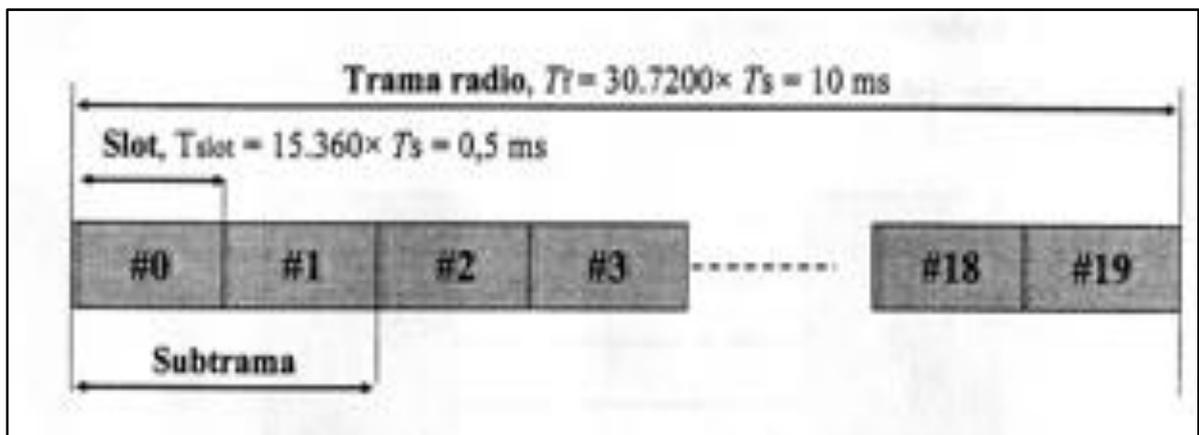


Fig.2. 9: Estructura de tramas radio en LTE para FDD
Fuente: Comunicaciones Móviles, Sistemas GSM, UMTS y LTE [21]

En el tipo de trama definido para FDD, cada trama de radio es de 10 ms de largo y consta de 10 subtramas. Cada subtrama contiene dos slots. En FDD, tanto el enlace ascendente y descendente tienen la misma estructura de la trama.

Interfaces EUTRAN (S1, X2)

En LTE la red de acceso E_UTRAN consta principalmente de dos interfaces: S1 y X2. La primera conecta los eNode B con el core de LTE (EPC), con el MME para la

señalización y con el SWG para los datos. La segunda conecta los eNodo B entre sí, como se ha podido ver en la figura 2.6.

Interfaz S1 (eNB - MME)

La interfaz S1, de la que existen dos versiones: S1-MME y S1-U, conecta el eNodo B con el core (MME en el plano de control y SGW en el plano de datos, respectivamente). Utiliza SCTP en la capa de transporte para el plano de control, que garantiza la entrega de mensajes de señalización entre la MME y el eNodo B. La torre de protocolos de esta interfaz se puede ver en la figura 2.10. La funcionalidad de S1 es la siguiente:

- Gestionar el portador SAE.
- Transferencia de contexto inicial del UE y su liberación.
- Proporcionar las funciones de movilidad de la UE.
- Proporcionar notificaciones.
- Establecimiento y gestión de llamadas.
- Transporte de señalización NAS.
- Transferencia de estados.
- Generación de informes de errores.

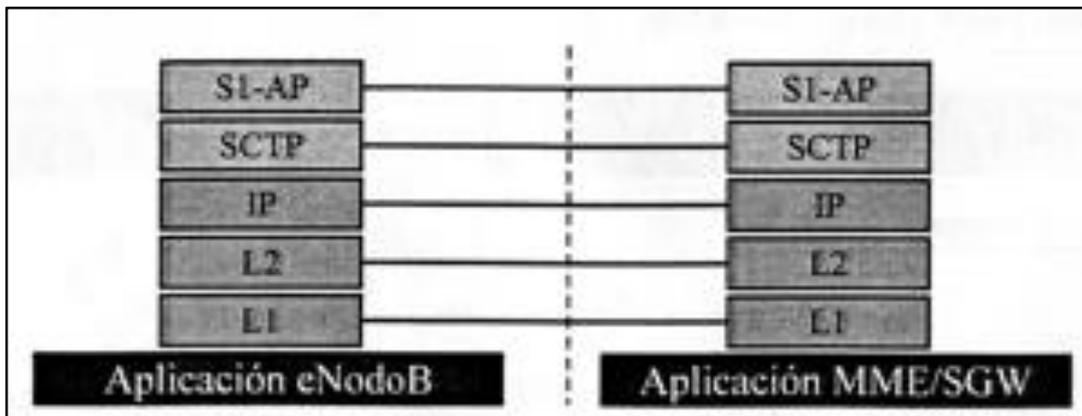


Fig.2. 10: Torre de protocolos de la interfaz *S1* en el plano de control.

Fuente: Comunicaciones Móviles, Sistemas GSM, UMTS y LTE [21]

X2 Interfaz (eNB - eNB)

La interfaz X2 permite la conexión entre los eNodo B. A través de ella se realizan las funciones de handover y de coordinación entre los diferentes eNodo B.

La figura 2.11 muestra la torre de protocolos de esta interfaz.

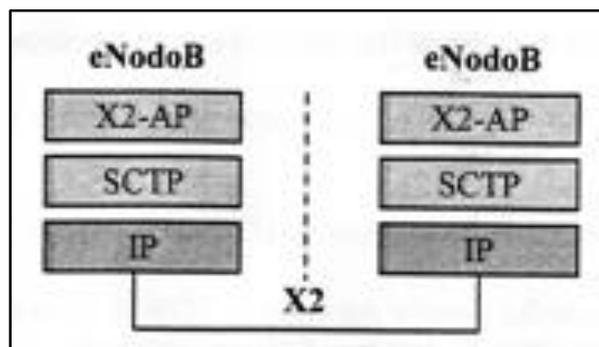


Fig.2. 11: Torre de protocolos de la interfaz X2.

Fuente: Comunicaciones Móviles, Sistemas GSM, UMTS y LTE [21]

2.2.7 Protocolos

La pila (stack) de protocolos usados en la interfaz entre el equipo de usuario y los eNB, así como entre éste y el MME situado en la red core: Uu y la S1-MME respectivamente, se muestra en la figura 2.12. Como se observa, el protocolo NAS corre directamente el UE y el MME. Las capas de protocolos inferiores al NAS implementan funcionalidades como paging, handover, administración del contexto de usuario, etc.

Las interfaces S11 y S10, que interconectan el MME-SGW y MME-MME respectivamente, usan el protocolo GTP-C, como se ve en la figura 2.13.

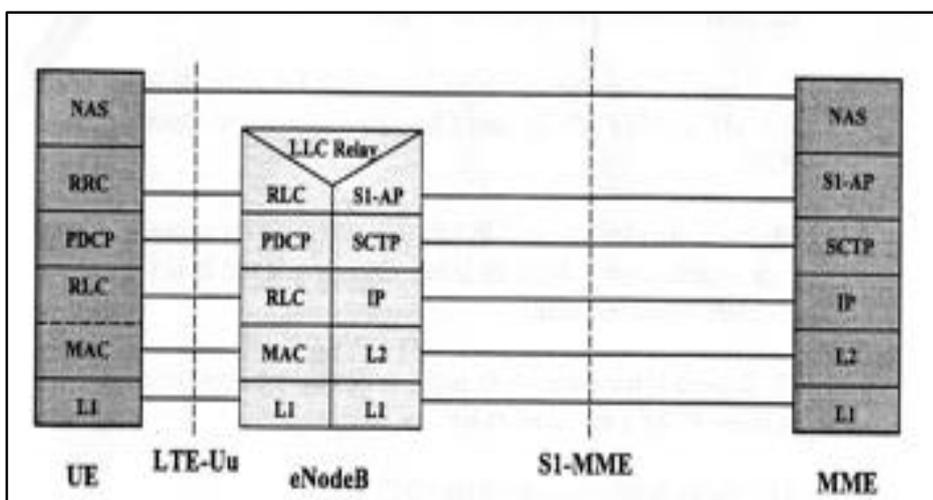


Fig.2. 12: Pila de protocolos en las interfaces radio Uu y S1-MME.

Fuente: Comunicaciones Móviles, Sistemas GSM, UMTS y LTE [21]

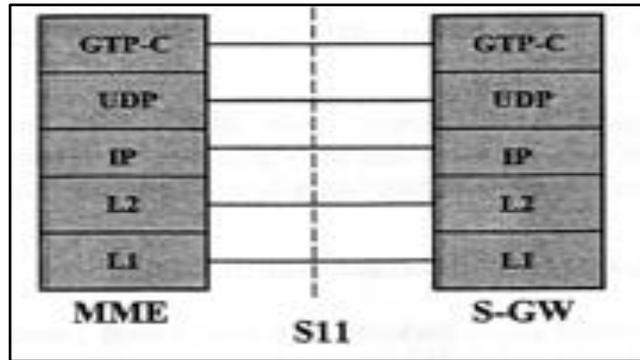


Fig.2. 13: Pila de protocolos en la interfaces S10 y S11.

Fuente: Comunicaciones Móviles, Sistemas GSM, UMTS y LTE [21]

En la interfaz S5/S8 se puede usar GTP o PMP. Estos dos protocolos soportan movilidad en IP (mobile IP) y trabajan bajo IPv4 o IPv6.

2.2.8 Tramas de radio

La mejor cantidad de recursos que pueden ser asignados por el eNode B a un terminal móvil en el enlace ascendente o descendente se llama un bloque de recursos (RB). Es la unidad más pequeña en la capa física y por ello se denomina también como PRB.

En el estándar LTE, un RB cuenta con 12 subportdaoras consecutivas con un espacio entre ellas de 15 kHz, lo que, para mantener la ortogonalidad, da una longitud de símbolo de $1/15 \text{ kHz} = 66,7 \mu\text{s}$. Las tramas de radio FDD duran 10ms y están divididas en 20slots de 0,5ms, tal como se muestra en la figura 2.14. El tamaño máximo de un bloque de información es de 6.144 bits, y se utiliza el algoritmo CRC-24 para detección de errores.

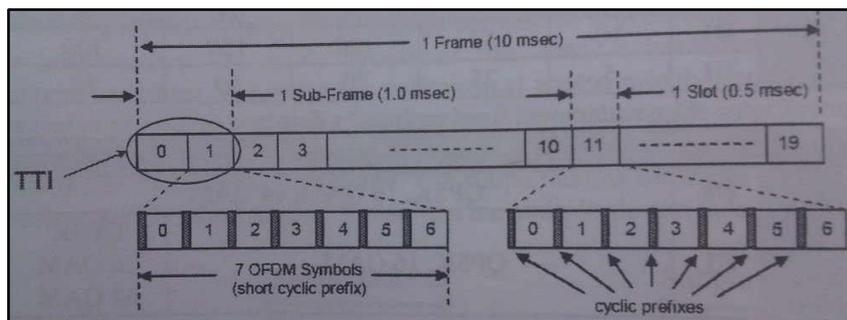


Fig.2. 14: Estructura de una trama radio de LTE.

Fuente: Comunicaciones Móviles, Sistemas GSM, UMTS y LTE [21]

La estimación de las tasas de pico de datos (o velocidades máximas de transmisión), que se consideran viables para el sistema LTE, en condiciones ideales, están en el rango de

100 a 326,4Mbit/s en el enlace descendente y de 50 a 86,4Mbit/s en el enlace ascendente, en función de la configuración de la antena y esquema de modulación. Estas tasas representan el máximo absoluto que el sistema podría soportar; sin embargo los valores reales se han reducido para adaptarlos a las categorías de terminales (UE) definidas, que se muestran en la tabla 2.2, así como las características soportadas.

LTE utiliza una serie de mecanismos en la capa física para mejorar el rendimiento y reducir la latencia. Entre ellos están la petición de repetición automática híbrida (HARQ) y la modulación y codificación adaptativa (AMC).

HARQ es una técnica para asegurar que los datos se envían de forma fiable, identificando cuándo se producen errores de transmisión y facilitando la retransmisión desde la fuente (eNodo B). LTE utiliza el protocolo HARQ tipo II-, similar a como lo hacen HSPA y HSPA+. AMC es el mecanismo utilizado para mejorar el rendimiento de los datos en un canal con desvanecimiento. Esta técnica varía el esquema de modulación y de codificación del enlace descendente sobre la base de las condiciones del canal de cada usuario. Cuando la calidad del enlace es buena, el sistema LTE puede utilizar un esquema de modulación de orden superior (más bits por símbolo) o menos bits en la codificación del canal, que se traduce en velocidades de datos superiores. Cuando las condiciones del enlace son pobres, debido a problemas tales como desvanecimiento de la señal o interferencia, el sistema puede utilizar una profundidad de modulación más baja o una codificación más fuerte de canal para mantener unos márgenes aceptables en el enlace radio.

Los procedimientos de control de potencia incluyen la asignación de la potencia ascendente y el control de potencia en el enlace descendente. El control de potencia en sistemas OFDM es menos crítico que en los sistemas CDMA, ya que con OFDM las señales están separadas en el tiempo y en la frecuencia, mientras que en CDMA deben compartir el mismo canal físico y se separan por la difusión del código, que requiere de límites mucho más estrictos sobre la potencia recibida.

La importancia del control de potencia crece con la MU-MIMO, que funciona mejor cuando la potencia recibida de cada UE en el eNodo B está equilibrada.

Tabla2. 1: Categorías de terminales de LTE Release 8.

Categorías		1	2	3	4	5
Velocidad de pico Mbit/s	DL	10	50	100	150	300
	UL	5	25	50	50	75
Capacidad para funcionalidades físicas						
Ancho de banda RF		20 MHz				
Modulación	DL	QPSK, 16QAM, 64QAM				
	UL	QPSK, 16 QAM				QPSK 16 QAM 64 QAM
Multi-antena						
Diversidad 2Rx		Requerimientos de rendimiento asumidos				
2x2 MIMO		No soportado	Obligatorio			
4x4 MIMO		No soportado				Obligatorio

Fuente: Comunicaciones Móviles, Sistemas GSM, UMTS y LTE [21]

2.2.9 Estructura de canales en LTE

Como sucede en UMTS, en LTE también hay tres categorías en las que los diferentes canales de datos se pueden agrupar:

Físicos: estos son los canales de transmisión que llevan los datos del usuario y los mensajes de control.

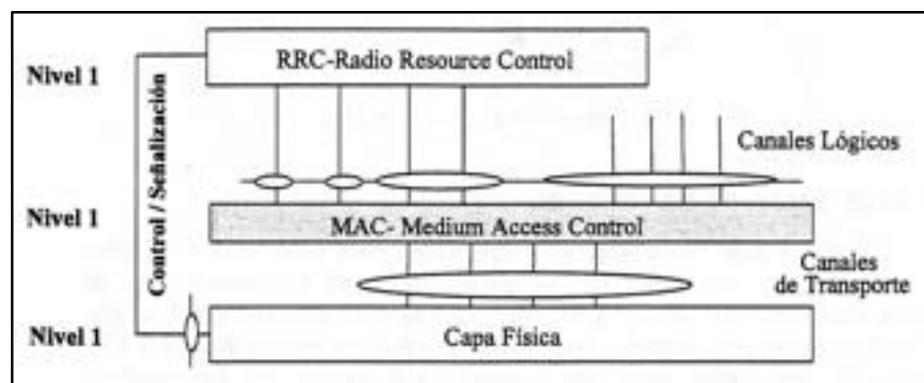
Transporte: ofrecen servicios de transferencia de información a la subcapa MAC y a las capas superiores.

Lógicos: proporcionan servicios para la subcapa MAC dentro de la estructura del protocolo LTE.

El nivel físico (Nivel 1 o Capa 1) proporciona el transporte de los servicios de datos a las capas superiores. A estos se accede por medio de los canales de transporte.

La capa física proporciona canales de transporte al subnivel de control de acceso al medio (MAC), y éste provee canales lógicos al subnivel de control del enlace de radio (RLC), ambos situados en el Nivel 2.

Los canales de transporte se caracterizan por la forma en que la información se transfiere a través de la interfaz de radio, mientras que los canales lógicos se caracterizan por la clase de información transferida. En la figura 2.15 se observa el diagrama que muestra su situación, donde los círculos entre los distintos niveles o capas indican puntos de acceso de servicio (PAE). La Capa 1 también se conecta a la Capa 3 de control de recursos radio (RRC).



.Fig.2. 15: Estructura de canales en LTE, en las diferentes capas.

Fuente: Comunicaciones Móviles, Sistemas GSM, UMTS y LTE [21]

Canales Físicos

Las señales físicas se generan en la Capa 1 y se utilizan para la sincronización del sistema, la identificación de celdas y la estimación del canal de radio. Los canales físicos llevan los datos de las capas superiores, incluido el control, la configuración y los datos de usuario. Los canales físicos en LTE varían entre el enlace ascendente y descendente, ya que ambos operan y tienen características diferentes.

Enlace descendente (downlink)

- **Canal físico de difusión (PBCH):** Este canal físico transporta la información del sistema que los equipos de usuario (UE) requieren para acceder a la red.
- **Canal físico de control del enlace descendente (PDCCH):** El objetivo principal de este canal físico es llevar la información de configuración (asignación de los canales de radio o scheduling).

- **Canal físico de indicador híbrido ARQ (PIHCH):** Como su nombre indica, este canal se utiliza para informar del estado ARQ híbrido.
- **Canal físico compartido del enlace (PDSCH):** Este canal se utiliza para las funciones de unicast y avisos.
- **Canal físico multicast (PDSCH):** Lleva la información del sistema para fines de multidifusión.
- **Canal físico de indicador del formato de control (PCFICH):** Proporciona información para que el equipo de usuario (UE) pueda decodificar el PDSCH.

Enlace ascendente (uplink)

- **Canal físico de control en el enlace ascendente (PUCCH):** Envía el reconocimiento ARQ híbrido.
- **Canal físico compartido en el enlace ascendente (PUSCH):** Este canal físico encontrado en el enlace ascendente LTE es la contraparte del de PDSCH en el enlace ascendente.
- **Canal físico de acceso aleatorio (PRACH):** Este canal físico del enlace ascendente se utiliza para funciones de acceso aleatorio.

La capa física ofrece servicios de transporte de datos a las capas superiores a través de los canales de transporte (TrCH) y los canales de control de la información.

Canales de transporte

Los canales de transporte en LTE son diferentes en el enlace ascendente y descendente, ya que cada uno tiene necesidades y opera de una manera diferente. Los canales de transporte ofrecen información de transferencia de información a la capa de control de acceso al medio y las capas superiores.

Enlace descendente (downlink)

Canal compartido en el enlace descendente (DL-SCH): Este canal de transporte es el principal para la transferencia de datos en el downlink.

Es utilizado por muchos canales lógicos.

Canal de difusión (BCH): Este canal de transporte LTE mapea a los canales de control de difusión (BCCH).

Canal de notificación (PCH): Para transmitir el PCCH.

Canal multicast (MCH): Se utiliza para transmitir información MCCH para crear transmisiones de multidifusión.

Enlace ascendente (uplink)

Canal compartido en el enlace ascendente (UL-SCH): Este canal de transporte es el principal canal para la transferencia de datos en el uplink.

Es utilizado por muchos canales lógicos.

Canal de acceso aleatorio (RACH): Se utiliza para los requisitos de acceso aleatorio.

Canales Lógicos

Los canales lógicos se clasifican en canales de control y canales de datos.

Canales de control:

- **Canal de control de difusión (BCCH):** Proporciona información del sistema a todos los terminales móviles al eNodo B.
- **Canal de control notificación (PCCH):** Se utiliza para enviar información de aviso en la búsqueda de una unidad en una red.
- **Canal de control común (CCCH):** Se emplea para obtener información de acceso aleatorio; por ejemplo, acciones que incluyen la creación de una conexión.
- **Canal de control de transporte multicast (MCCH):** Se utiliza para la información necesaria para la recepción de multicast.
- **Canal dedicado de control (DCCH):** Se utiliza para llevar información de control específica del usuario; por ejemplo, para las acciones de control, incluyendo el control de potencia, entrega, etc.

Canales de tráfico:

Canal de tráfico dedicado (DTCH): Este canal de tráfico se utiliza para la transmisión de los datos del usuario.

Canal de tráfico multicast (MTCH): Este canal es utilizado para la transmisión de datos de multidifusión.

2.2.10 Tecnologías contempladas en LTE

OFDM: Se ha incorporado a LTE porque permite un ancho de banda para los datos y que estos se transmitan de manera eficiente, sin dejar de ofrecer un alto grado de protección frente a las reflexiones e interferencias. OFDM se utiliza en el enlace descendente, mientras que SC-FDM se utiliza en el enlace ascendente porque la relación potencia de pico/potencia media (PAPR) es pequeña y un valor más constante permite una alta eficiencia del amplificador de potencia RF de los teléfonos móviles, un factor importante para equipos alimentados por baterías.

MIMO: Uno de los principales problemas que los sistemas de telecomunicaciones anteriores han encontrado es debido a señales múltiples, que siguen diferentes trayectorias, derivadas de la cantidad de reflexiones. Mediante el uso de MIMO la desventaja se puede convertir en ventaja, y estas señales adicionales pueden ser utilizadas para aumentar el rendimiento.

Cuando se emplea MIMO es necesario el uso de múltiples antenas, lo que introduce cierta complejidad al sistema para permitir diferenciar las señales recibidas, y para ello se pueden utilizar matrices de antenas 2x2, 4x2, o 4x4, pero mientras que es relativamente fácil añadir nuevas antenas a una estación base, esto no es así en el caso de los teléfonos móviles, donde las dimensiones de los equipos limitan el número de antenas, que deberían estar separadas al menos media longitud de onda ($\lambda/2$), lo que resulta un grave inconveniente.

SAE: Con la alta tasa de datos y requisitos de baja latencia para 4G LTE, fue necesario desarrollar la arquitectura del sistema para permitir alcanzar los mejores resultados, y uno de los cambios es que un número de las funciones anteriormente a cargo de la red básica se ha transferido a la periferia. Esencialmente, esto proporciona una arquitectura de red plana y, de esta forma, los tiempos de latencia pueden ser reducidos y los datos pueden encaminarse de forma más directa a su destino.

2.2.11 Fundamentos de OFDMA y SC-FDMA

Como ya se ha comentado respecto a la tecnología radio usada en LTE, ésta se basa en el uso de Acceso Múltiple por División Ortogonal de Frecuencia (OFDMA) para el enlace

descendente, y de Acceso Múltiple en Frecuencia con una sola Frecuencia Portadora (SC-FDMA) para el enlace ascendente.

La modulación de las subportadoras se hace con alguna variante de QAM con M estados de modulación, según una constelación en ejes I y Q. Cada símbolo de modulación es un punto de la constelación representado por un número complejo que corresponde a $\log_2 M$ bits, por lo que cada símbolo OFDM consta de $N_c \cdot \log_2 M$ bits y su período es:

$$T_{\text{útil}} = T_b \cdot N_c \cdot \log_2 M \quad (1)$$

siendo T_b el período de bit, y N_c el número de canales (subportadores).

Técnica de Acceso Múltiple OFDMA

OFDMA es una variante de la Multiplexación por División Ortogonal de Frecuencia (OFDM), ampliamente utilizada en sistemas inalámbricos, pero relativamente nueva para sistemas celulares. Se hace uso de un gran número de subportadoras ortogonales muy próximas entre sí. Que se transmiten en paralelo.

Cada subportadora modula con un esquema de modulación convencional (por ejemplo, QPSK, 16 QAM o 64 QAM) a una cierta velocidad de símbolo baja. La combinación de estas subportadoras permite alcanzar altas velocidades de datos.

El diagrama de la figura 2.16 muestra las principales características de una señal OFDM en frecuencia y en el tiempo. En el dominio de la frecuencia, múltiples tonos adyacentes o subportadoras son cada uno, independientemente, modulados con datos. Entonces, en el dominio del tiempo, se insertan los intervalos de guarda entre cada uno de los símbolos para evitar la interferencia entre ellos (ISI) en el receptor, causada por el retraso debido al efectuar la señal varios caminos de difusión (multipath) en el canal de radio.

Las transmisiones de diferentes terminales en OFDM podrían sufrir desvanecimiento e interferencia en banda estrecha, por lo que para el enlace descendente 3GPP eligió OFDMA, que incorpora elementos de TDMA. OFDMA asigna de forma dinámica entre los usuarios subconjuntos de las subportadoras y el resultado es un sistema más robusto, con mayor capacidad, lo que se debe a la eficiencia de trunking de multiplexación de los usuarios para una mayor resistencia al desvanecimiento de frecuencia selectivo.

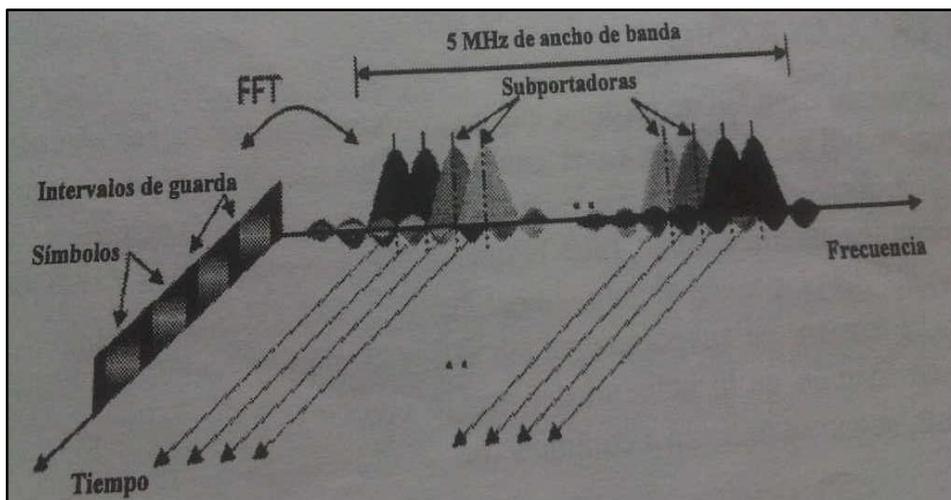


Fig.2. 16: Representación de una señal OFDM en frecuencia y en el tiempo.

Fuente: Comunicaciones Móviles, Sistemas GSM, UMTS y LTE [21]

En OFDMA, la forma de trabajo consiste en la separación de una sola señal en subportadoras, es decir, en dividir una señal extremadamente rápida en numerosas señales más lentas que optimicen el acceso móvil, y con los subcanales formados se pueden transmitir los datos sin estar sujetos a las interferencias y a la intensidad de distorsión de trayectoria múltiple a la que se enfrenta la transmisión de una única portadora. Las subportadoras múltiples se recogen en el receptor y se recombinan para formar una transmisión de alta velocidad.

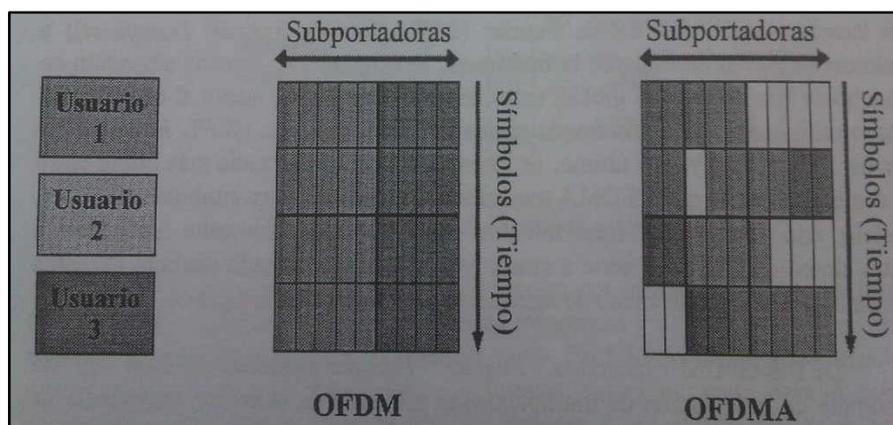


Fig.2. 17: Diagrama de funcionamiento de OFDM y OFDMA.

Fuente: Comunicaciones Móviles, Sistemas GSM, UMTS y LTE [21]

La diferencia entre OFDM y OFDMA es que OFDMA tiene la capacidad para asignar dinámicamente un subconjunto de las subportadoras a los usuarios individuales, haciendo de esta la versión multiusuario de OFDM (OFDMA soporta simultáneamente múltiples

usuarios mediante la asignación de los subcanales específicos para los intervalos de tiempo).

Técnica de Acceso Múltiple SC-OFDMA

Fue elegido para el UL de LTE, ya que combina las técnicas de PAPR bajo, como GSM y CDMA, con la resistencia a interferencias y con la atribución de frecuencias flexibles de OFDMA. En SC-FDMA, los símbolos de datos en el dominio del tiempo se convierten en el dominio de la frecuencia usando una transformación discreta de Fourier; a continuación, en el dominio de la frecuencia, se asignan a la deseada ubicación en el ancho de banda de canal global, antes de ser convertida de nuevo en el dominio del tiempo utilizando una transformada rápida de Fourier inversa y, por último, se inserta el CP. La diferencia más obvia entre los dos esquemas es que OFDMA transmite los datos de cuatro símbolos QPSK en paralelo, uno por subportadora, mientras que SC-FDMA transmite los datos de cuatro símbolos QPSK en serie a cuatro veces la tasa de datos, con cada símbolo de datos ocupando $M \cdot 15\text{kHz}$ de ancho de banda. Esto se muestra en la figura 2.18.

DFT-S-OFDM es la tecnología de modulación de multiplexación utilizada en el enlace ascendente de LTE, que es similar a OFDM pero que elimina las limitaciones causadas por una PAPR alta. A cada usuario se le asigna parte del ancho de banda del sistema. Por su parte, SC-OFDMA es la tecnología de acceso múltiple relacionada con DFT-S-OFDM, por lo que se puede hacer referencia tanto a uno como a otro término para referirse a lo mismo, siendo en cierto modo equivalentes.

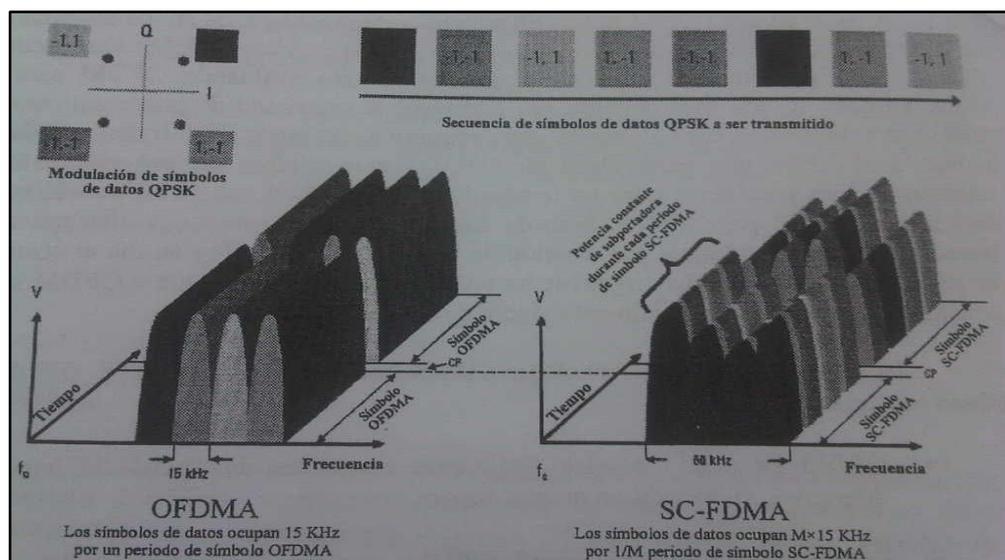


Fig.2. 18: Diagramas de funcionamiento de OFDMA y SC-FDMA.
Fuente: Comunicaciones Móviles, Sistemas GSM, UMTS y LTE [21]

Modos de funcionamiento: FDD y TDD

Al igual que en UMTS, también en LTE se han definido los modos FDD y TDD, que permiten el uso de bandas de frecuencias pareadas y no pareadas.

Aunque el modo FDD proporciona mayor eficiencia espectral, TDD tiene la aplicación adicional de poder ser usado como tecnología de transmisión de acceso. Tanto uno como otro serán soportados por los terminales móviles LTE.

FDD y TDD tienen sus propias fortalezas y debilidades. FDD es generalmente más apropiado para aplicaciones como llamadas de voz que tiene un tráfico en ambas direcciones es siempre constante y emplear TDD sería desperdiciar ancho de banda en constante cambio de uno a otro sentido.

TDD es mejor en las aplicaciones que tienen el tráfico asimétrico, por ejemplo, la navegación por Internet. En la navegación web es típico que la descarga sea mucho mayor que la subida, pero en algunos casos, como es, por ejemplo, cuando se va a subir un vídeo a YouTube, ocurre lo contrario. TDD puede asignar más tiempo para la arte que requiere más ancho de banda, con lo que se da el equilibrio de la carga.

Con FDD, el ancho de banda no se puede reasignar dinámicamente, así que el no utilizado se desperdicia. Otra de las ventajas de FDD consiste en la planificación de sitios para las estaciones base, pues en el caso de FDD, al usar distintas bandas de frecuencia para los

enlaces ascendentes y descendentes, no se requiere una planificación espacial entre estaciones base; sin embargo, en el caso de TDD deben ser tomadas en cuenta consideraciones espaciales con el fin de evitar que las estaciones base vecinas se interfieran unas a otras.

La técnica de acceso múltiple OFDMA, utilizada en el enlace descendente de LTE, surge de forma natural a partir de la modulación OFDM. De esta forma, es posible acomodar varias transmisiones simultáneas correspondientes a diferentes flujos de información al viajar en subportadoras diferentes. [21]

MIMO

Uno de los esquemas multiantena que LTE utiliza es MIMO (Multiple Input Multiple Output), aprovechando la propagación multirrayecto para mejorar la transmisión de datos, disminuir los errores y lograr un mayor alcance. Definida como dos o más señales de radio diferentes en el mismo canal de radiotransmisión, en la que cada señal lleva distinta información digital, se estandarizó en el Release 6 del 3GPP, y se mejoró en el Release 7 con multiplexado especial para HSPA+.

El uso de múltiples antenas en el transmisor y el receptor permiten:

Aumento importante en las tasas máximas de datos.

Eficiencia espectral, en especial en entornos de baja interferencia.

Mayor capacidad del sistema (usuarios)

MIMO con un esquema de transmisión basado en un circuito cerrado de 2 x 2, puede incrementar la eficiencia espectral en Downlink en un 20 %, frente a la transmisión usando una sola antena.

Para los operadores de redes inalámbricas el uso de MIMO representa una forma económica de conseguir: aumentar la capacidad, el rango y velocidad de transmisión al usuario en una variedad de entornos, siendo los más notables, los entornos cerrados y de baja interferencia de radio, como las celdas pequeñas y aisladas. [22]

Con la estrategia de despliegue adecuada, la tecnología MIMO (Multiple Input Multiple Output: Múltiples Entradas y Múltiples Salidas) puede aumentar la capacidad de las redes

de microondas, LTE y WiMAX. Pero MIMO funciona de un modo diferente en redes como LTE y WiMAX a cómo opera en redes de microondas. Para aprovechar al máximo las ventajas de MIMO, es necesario que los proveedores de servicios entiendan cómo opera MIMO y por qué funciona de un modo diferente en las diversas redes.

La ventaja de MIMO

MIMO utiliza al menos dos antenas, a veces varias, en el lado de transmisión (Tx) y en el lado de recepción (Rx) para transmitir un único canal. Esta configuración aumenta la velocidad de datos y la eficiencia espectral. Por ejemplo, añadir 6 antenas en cada lado produce el mismo aumento de capacidad que aumentar 100 veces la potencia de un canal SISO (Single Input Single Output: Una Entrada y Una salida).

Las técnicas utilizadas en MIMO aumentan la capacidad linealmente con el número de antenas. Por el contrario, los planteamientos utilizados en los sistemas SISO, SIMO (Single Input Multiple Output: Una Entrada y Múltiples Salidas) y MISO (Multiple Input Single Output: Múltiples Entradas y Una Salida) aumentan la capacidad de forma logarítmica. Un aumento lineal de la capacidad proporciona una evolución hacia altas capacidades mucho más eficiente que el aumento logarítmico.

Los transmisores y receptores utilizados en MIMO son más complejos que los utilizados en SISO, SIMO y MISO, pero no consumen más energía.

La ventaja de MIMO es tan evidente que ya son numerosos los estándares que han incorporado esta tecnología. Entre otros cabe destacar:

- El estándar HSPDA (High Speed Downlink Packet Access: Acceso de Paquetes en el Canal Descendente de Alta Velocidad) de la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones), que a su vez forma parte del estándar UMTS (Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles).
- El estándar 802.11n del IEEE (Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica) utilizado en los routers inalámbricos de los hogares.
- El estándar 802.16 del IEEE para la tecnología WiMAX utilizada en los teléfonos móviles.
- El estándar LTE de la UIT

MIMO cumple la ley de Shannon

Cuando a mediados de los años 90 los sistemas MIMO fueron descritos por primera vez por Gerard Foschini y otros, la gran eficiencia espectral conseguida parecía violar la ley de Shannon. En realidad, la diversidad y el procesamiento de señal utilizados en MIMO transformaban un único canal punto a punto en múltiples canales paralelos.

La ley de Shannon se basa en un canal de capacidad C , con ruido, y con velocidad de transmisión de la información R . Y establece que si R es menor que C , entonces debe haber códigos que permitan que la probabilidad de error en el receptor sea arbitrariamente pequeña. Esto significa que, teóricamente, es posible transmitir información prácticamente sin ningún error a cualquier velocidad que esté por debajo de una determinada velocidad límite C .

Esta capacidad normalmente se expresa de la siguiente forma:

$$C = W \log_2(1 + S/N) \quad (2)$$

donde:

C es la capacidad del canal en bits por segundo

W es el ancho de banda en Hertzios

S/N es la relación señal – ruido

MIMO es una técnica muy potente para aumentar la capacidad en redes LTE y WiMAX sin visibilidad directa entre las antenas. Y la funcionalidad MIMO LoS de visibilidad directa puede ser muy útil para aumentar la capacidad en determinados escenarios de enlaces de microondas punto a punto. Aquellos proveedores de servicios que entiendan cuándo y dónde tiene sentido utilizar MIMO, estarán en mejor posición para sacar el máximo partido de la tecnología MIMO. [23]

2.2.12 Modelos de Propagación. Introducción

Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características de radio de un ambiente dado.

Generalmente los modelos de predicción se pueden clasificar en empíricos o estadísticos, teóricos o determinísticos o una combinación de estos dos (semiempíricos).

Mientras que los modelos empíricos se basan en mediciones, los modelos teóricos se basan en los principios fundamentales de los fenómenos de propagación de ondas de radio. Los modelos de propagación predicen la pérdida por trayectoria que una señal de RF pueda tener entre una estación base y un receptor sea móvil o fijo.

La ventaja de modelar radiocanales teniendo en cuenta las características de la trayectoria entre Transmisor (Tx) y Receptor (Rx), es conocer la viabilidad de los proyectos que se deseen planear en determinados sectores, de esta manera se podrá hacer una estimación acerca de la necesidad, costos y capacidad de los equipos requeridos. [24]

Los primeros métodos se presentaron en forma de ábacos y curvas de propagación normalizadas, para su utilización manual. Posteriormente se han ido desarrollando versiones y ampliaciones de los mismos, adaptadas al cálculo por ordenador, a fin de incorporarlas en programas informáticos.

Los métodos empíricos proporcionan una estimación rápida de la pérdida básica de propagación o, alternativamente, de la intensidad de campo en cualquier punto entorno a un transmisor.

Los métodos más utilizados y recomendados por el UIT-R: Lee, Hata, Rec, UIT-R 529 y COST 231-Walfish Ikegami. [25]

2.2.13 Modelo de QoS

El modelo de QoS “delimita” el comportamiento esperable del servicio de conectividad proporcionado por una red de transmisión de paquetes. La concreción del comportamiento esperable se materializa mediante la especificación de un conjunto de parámetros de QoS asociados a la obtención de unas determinadas prestaciones en términos de, por ejemplo, tasa (bits/s), retardos de transferencia y tasa de pérdida de paquetes. La forma de “delimitar” el comportamiento admite diferentes grados de determinismo que condicionan el tipo de mecanismos necesarios para poder aplicar el modelo de QoS. A modo de ejemplo, en redes IP basadas en una arquitectura de QoS Diffserv, el modelo de QoS se plantea en base a conseguir diferenciar tráfico (e.g., priorizar el envío de unos paquetes frente a otros) y no se contempla el poder establecer una cota de retardo máximo. Esto hace que la implementación del modelo Diffserv sea relativamente sencilla y escalable. En cambio, en una arquitectura de QoS IntServ, el

modelo de QoS permite especificar una cota máxima del retardo de transferencia entre dos nodos de una red IP. La materialización de dicha cota conlleva la necesidad de reservar recursos de transmisión en cada uno de los nodos de la red, por lo que la aplicación de dicho modelo tiene problemas de escalabilidad. Un modelo de QoS también determina el grado de flexibilidad que ofrece un sistema para gestionar la capacidad de transmisión disponible. Está claro que, en redes como LTE, planteamientos de sobredimensionado de la capacidad de transmisión de la red no son viables económicamente (el espectro es limitado y el coste de la infraestructura de red muy elevado). Por tanto, la porción de capacidad de transmisión asignada a un determinado servicio portador debe establecerse en base a las prestaciones mínimas exigibles para garantizar una buena experiencia de uso del servicio final.

EPS depende del tipo de servicio final que se curse a través de dicho servicio portador.

A modo de ejemplo, el comportamiento de QoS exigible será completamente diferente en caso de cursar un servicio de VoIP o un servicio de navegación HTTP. Asimismo, la cantidad de recursos de transmisión y la operativa de asignación dinámica de los mismos también serán completamente diferente en ambos casos. Adicionalmente, los parámetros de QoS exigibles al servicio portador pueden también fijarse en función del tipo de usuario. De esta forma, el soporte de QoS puede explotarse también para diferenciar entre usuarios en función, por ejemplo, de las condiciones suscritas en la contratación del servicio. Bajo esta perspectiva, para un mismo servicio, el operador de la red LTE puede ofrecer un comportamiento del sistema diferente para, por ejemplo, usuarios de negocios frente a usuarios convencionales, usuarios de contrato frente a usuarios pre-pago, usuarios privilegiados en situaciones de emergencia (policía, bomberos), etc.

En LTE, el modelo de QoS utilizado para definir el comportamiento de un servicio portador

EPS se basa en la especificación de un máximo de cuatro parámetros. Además de estos cuatro parámetros, el modelo de QoS se complementa con dos parámetros adicionales asociados a la suscripción de un usuario. En la Figura 2.19 se esquematiza el conjunto completo de parámetros de QoS considerado en el sistema LTE.

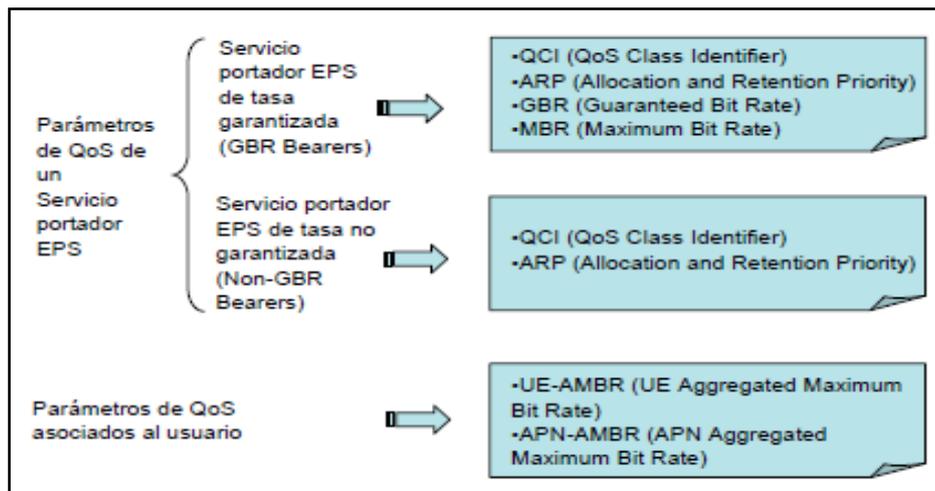


Fig.2. 19: Parámetros de QoS en el sistema LTE

Fuente: LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles [26]

Cada servicio portador EPS siempre tiene asociados como mínimo dos parámetros: QCI (QoS Class Identifier) y ARP (Allocation and Retention Priority). De forma general, el parámetro QCI determina el comportamiento del plano de usuario del servicio portador EPS mientras que el parámetro ARP aplica a la operativa del plano de control. Adicionalmente, algunos servicios portadores denominados como servicios de tasa garantizada (*GBR Bearers*) especifican también un parámetro de tasa media garantizada (GBR) y otro de tasa máxima permitida (MBR). A continuación se describe más detalladamente el significado de dichos parámetros.

El QCI es un parámetro que representa una determinada clase de servicio o comportamiento de la red. El valor del QCI no indica de forma directa ninguna magnitud relacionada con las prestaciones de la red sino que simplemente se concibe como un puntero a una determinada clase de servicios. De esta forma, la selección de un valor de QCI para un servicio portador EPS implica la utilización de una serie de parámetros específicos en cada uno de los nodos que procesan el plano de usuario (e.g., pesos del scheduling, umbrales del control de admisión, configuración de los parámetros de capa de enlace y capa física, etc.). Dichos parámetros podrían haber sido pre-configurados en el equipo por el fabricante en cuestión o bien por el propio operador de la red. Dada la gran flexibilidad que ofrece este esquema, 3GPP ha especificado el comportamiento esperable para un conjunto de QCIs de forma que pueda utilizarse como guía en la configuración de los mecanismos que afectan a la QoS en cada nodo. La finalidad última

en la estandarización de un conjunto de QCIs es la de facilitar la consecución de un determinado comportamiento en redes con equipos de diferentes fabricantes así como en escenarios de itinerancia. [26]

2.2.14 Canales de Radio

Se puede definir el canal como el enlace entre dos puntos de un trayecto de comunicaciones.

El canal de radio, por lo general, es lineal y recíproco (permite estudiar el canal en una sola dirección). En la Figura 2.20 se muestran algunos de los diferentes tipos de canales de radio.

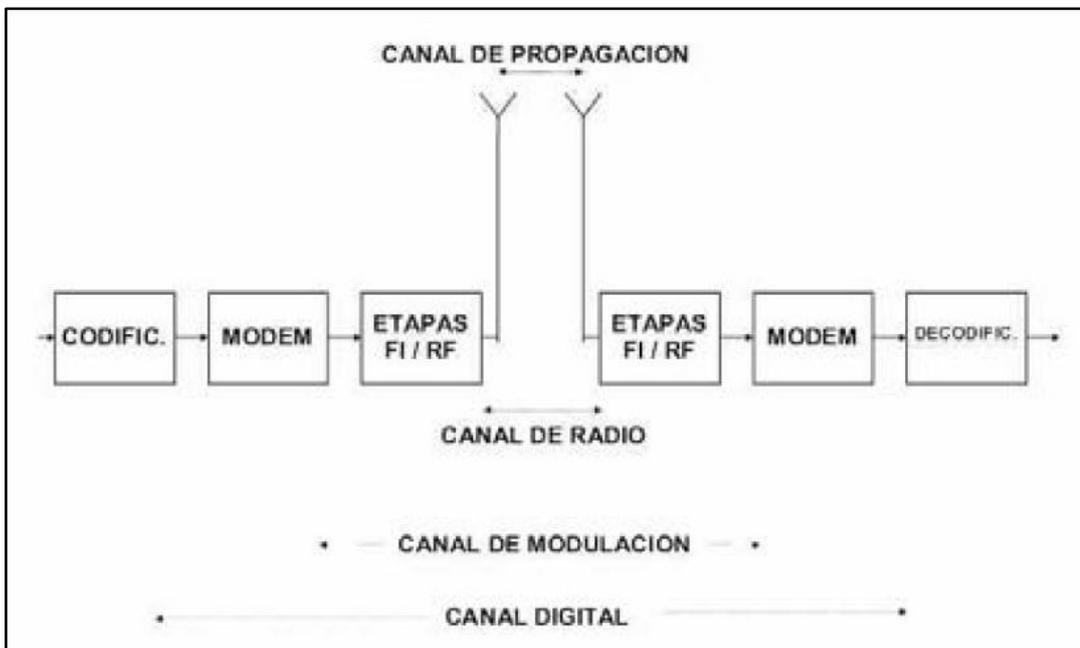


Fig.2. 20: Tipos de canal en Radiocomunicaciones.

Fuente: Radiocomunicación. [27]

El canal de propagación

El medio físico que soporta la propagación de la onda electromagnética entre la antena transmisora y la receptora constituye el canal de propagación. El canal se asume lineal y recíproco, pero puede variar en el tiempo, como en el caso de las comunicaciones móviles.

El canal de radio

El canal de radio está constituido por la antena transmisora, el canal de propagación y la antena receptora. Las antenas tienen el mismo patrón de radiación en transmisión y en recepción si son lineales, bilaterales y pasivas, lo cual hace que el canal de radio sea recíproco al serlo las antenas.

El canal de modulación

Se extiende desde la salida del modulador hasta la entrada del demodulador, y comprende las etapas finales del transmisor, el canal de radio y las etapas de entrada del receptor.

Su caracterización es importante a la hora de evaluar los diferentes esquemas de modulación. La linealidad del canal de modulación está determinada por los front-ends del transmisor y del receptor. Los sistemas que emplean modulaciones con multiniveles de amplitud, como la QAM, requieren canales de modulación lineales: amplificadores lineales, mezcladores de baja distorsión y filtros con fase lineal (Bessel o Gauss). Esto genera dos problemas: amplificadores más caros y menos eficientes en cuanto a la potencia, lo cual es de importancia capital en un entorno de comunicaciones móviles donde es imprescindible la reducción de las dimensiones y el consumo de la batería del terminal portátil. El canal de modulación no es recíproco al no serlo los front-ends.

El canal digital

Incluye todos los subsistemas que enlazan la secuencia digital sin modular del transmisor, con la secuencia regenerada en el receptor. En general, este canal no es lineal, no es recíproco y varía en el tiempo. [27]

2.2.15 Flexibilidad en la banda de despliegue

LTE puede operar en bandas de 2600MHz, 2100MHz, 1900MHz, 1800MHz, 1700MHz, 850MHz, 800MHz, 700MHz para su comercialización y en laboratorio ha funcionado en bandas que van desde 450MHz hasta los 3,5GHz. Por ende, el estándar define hasta 40 posibles bandas de operación trabajando en FDD o en TDD.

La tecnología LTE es una red móvil simplificada de alto rendimiento para su implementación se lo puede realizar en bandas de 700MHz, 800MHz, 1700 MHz, 1900MHz, 2100MHz.

La flexibilidad del espectro es una de las características clave de LTE. Ésta consiste en varios pasos que incluyen la flexibilidad en el ancho de banda usado dentro de la banda de despliegue, y la flexibilidad propia de la interfaz radio basada en acceso OFDMA que permite una optimización de su uso por medio de técnicas de asignación dinámica de espectro DSA (Dynamic Spectrum Assignment). En este apartado se cubren cada uno de estos aspectos.

La interfaz radio LTE es relativamente independiente de la banda de despliegue y en principio se puede desplegar en las bandas ya identificadas para IMT-2000 como en otras nuevas bandas que puedan aparecer en el futuro. Tanto las bandas ya identificadas para LTE como futuras bandas pueden ser pareadas (para despliegues FDD: Duplexado por División en Frecuencia) o no pareadas (para despliegues TDD: Duplexado por División en Tiempo). La siguiente tabla muestra las bandas de operación que se han identificado hasta el momento para LTE.

Tabla2. 2: Bandas mejor identificadas para el despliegue de LTE en la Release

Banda LTE	Banda para UL	Banda para DL	Tipo de Duplexado
1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD
3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
4	1710 MHz – 1755 MHz	2110 MHz – 2155 MHz	FDD
5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894MHz	FDD
6	830 MHz – 840 MHz	875 MHz – 885 MHz	FDD
7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	FDD
8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz – 1784.9 MHz	1844.9 MHz – 1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz – 1770 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz – 1452.9 MHz	1475.9 MHz – 1500.9 MHz	FDD
12	698 MHz – 716 MHz	728 MHz – 746 MHz	FDD
13	777 MHz – 787 MHz	746 MHz – 756 MHz	FDD
14	788 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz	FDD
17	704 MHz – 716 MHz	734 MHz – 746 MHz	FDD
33	1900 MHz – 1920 MHz	1900 MHz – 1920 MHz	TDD
34	2010 MHz – 2025 MHz	2010 MHz – 2025 MHz	TDD
35	1850 MHz – 1910 MHz	1850 MHz – 1910 MHz	TDD
36	1930 MHz – 1990 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	TDD
37	1910 MHz – 1930 MHz	1910 MHz – 1930 MHz	TDD
38	2570 MHz – 2620 MHz	2570 MHz – 2620 MHz	TDD
39	1880 MHz – 1920 MHz	1880 MHz – 1920 MHz	TDD
40	2300 MHz – 2400 MHz	2300 MHz – 2400 MHz	TDD

Fuente: LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles [28]

Existen ciertas limitaciones en lo relativo a los requerimientos de radiofrecuencia asociados a una determinada banda. En concreto, estas restricciones se ven motivadas por:

La coexistencia de los operadores en una misma zona geográfica. Estos operadores pueden desplegar distintas interfaces radio, y por lo tanto LTE debe especificar ciertos requerimientos que aseguren su coexistencia con otras tecnologías de acceso radio.

También afecta a despliegues donde distintos operadores comparten un mismo emplazamiento.

La coexistencia de LTE con otros servicios o sistemas desplegados en bandas adyacentes o en la frontera del país, donde cambia el marco regulador del espectro radioeléctrico.

El hecho de que LTE sea un sistema abierto desde el punto de vista de la banda de operación, de forma que futuras versiones del estándar agregan nuevas bandas de operación. Eso supone que los terminales se tengan que diseñar asumiendo que podrían funcionar en un amplio margen de frecuencias.

Estos requerimientos se suelen definir en términos de la máxima potencia permitida, las emisiones espurias, emisiones fuera de banda (Adjacent Channel Leakage Ratio), etc.

La interfaz radio de LTE basada en OFDMA ofrece una gran flexibilidad a la hora de desplegar el sistema dentro de una determinada banda, donde idealmente cualquier ancho de banda puede ser usado (en pasos de 180 kHz correspondientes a la anchura de banda de un PRB). No obstante, para facilitar la operación, LTE define un subconjunto de anchos de banda posibles. En concreto, se permiten bloques de espectro con 6, 15, 25, 50, 75 y 100 PRBs que se corresponden con anchos de banda nominales de 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz respectivamente.

Esta flexibilidad en el ancho de banda en uso por parte de un operador permitirá, dentro del marco conocido como spectrum refarming, el despliegue gradual de LTE en bandas asignadas previamente a otros sistemas como GSM o UMTS. Por ejemplo, en un despliegue GSM de 15 MHz con radiocanales de 200 kHz sería posible introducir LTE en tres etapas, donde en cada etapa se despliega LTE en una porción de aproximadamente 5 MHz de radiocanales GSM, a medida que decrezca el tráfico cursado sobre GSM [28].

2.3 Propuesta de solución

La simulación del modelo de propagación COST 231 Walfisch-Ikegami para el canal móvil de bandas 4G, es una alternativa para representar las características de radio en un ambiente urbano utilizando una herramienta de trabajo en un entorno gráfico como es GUIDE de Matlab a desarrollarse; obteniendo resultados de las ecuaciones y datos ingresados propuestos por el modelo propagación.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Modalidad de la Investigación

La investigación tiene una modalidad bibliográfica para argumentar eficientemente el contenido teórico, a través de diferentes fuentes primarias: repositorios digitales, libros, revistas, publicaciones, internet y otros documentos confiables que permitan sustentar científicamente el desarrollo de la propuesta.

La investigación también es de modo documental porque se estructurará metódicamente; por medio de fuentes primarias y secundarias. Además, porque tiene como propósito conocer, ampliar, profundizar y deducir diferentes enfoques teóricos, contextualizaciones, criterios de diversos autores estema de estudio y simulación.

3.2 Recolección de Información

Se recopiló información de fuentes bibliográficas, artículos, tesis y páginas de internet que contengan información referente al tema de investigación, así como la guía del tutor y de las pruebas que se llevarán a cabo durante la simulación.

3.3 Procesamiento de la información

Procesar información recolectada bibliográficamente que permitan tener una idea clara de cómo se encuentra el desarrollo de la tecnología 4G (LTE), guiarse por tesis, artículos, libros, páginas web y revistas que ayuden al desarrollo del proyecto.

3.4 Desarrollo del proyecto

- Recolección y procesamiento de información sobre las características de las redes 4G (LTE).
- Investigación de los modelos de propagación y de las diferentes distribuciones estadísticas.
- Recolección de información acerca de los modelos de propagación en especial del modelo de propagación COST 231 Walfisch-Ikegami.
- Realizar el diagrama de flujo previo a la programación.
- Programación en Matlab.
- Realizar pruebas de funcionamiento de la simulación.
- Discusión y análisis de los resultados obtenidos.
- Elaboración y presentación del proyecto final.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO DE LA PROPUESTA

4.1 Características Técnicas de las Redes LTE

Desde sus comienzos en 2004, el trabajo sobre LTE se centró en mejorar el acceso radio terrestre de UMTS (UTRA) y la optimización de la arquitectura 3GPP de acceso radio. En el enlace descendente se obtendrían velocidades de datos de usuario 100 Mbit/s y para el enlace ascendente de 50 Mbit/s. En 2007, la tecnología de acceso radio de LTE E-UTRAN pasó de la etapa de estudio de viabilidad a la elaboración de las especificaciones técnicas necesarias. A finales de 2008, las especificaciones eran lo suficientemente estables para su aplicación comercial.

Se seleccionó el método de acceso OFDMA para el enlace descendente y SC-FDMA para el enlace ascendente. En cuanto a esquemas de modulación para el enlace descendente BPSK, QPSK, 16 QAM Y 64 QAM, mientras que para el enlace ascendente se tienen QPSK, 8PSK y 16 QAM. E-UTRA utiliza una serie de anchos de banda de canal definido entre los 1,25 y 20 MHz (en contraste con uno fijo en UTRA de 5 MHz por canal). Los canales de difusión (broadcast) solo pueden emplear QPSK.

LTE está ya en el mercado, con redes desplegadas por varios operadores. La Rel-8 se congeló en diciembre de 2008 y ha sido la base para la primera ola de equipos LTE. Las especificaciones de LTE son estables, con el beneficio añadido de pequeñas mejoras que se introdujeron en la Rel-9, congelada en diciembre de 2009. Entre estas mejoras están:

- El apoyo de los servicios de emergencia, servicios de localización y difusión de alerta de emergencia. Estas características son fundamentales por la introducción de VoIP a través de LTE.
- Mejoras para la vuelta a conmutación de circuitos.
- Mejoras para MBMS para habilitar las capacidades de difusión/multidifusión sobre LTE.
- Red de auto-configuración y optimización, mejoras para optimizar el rendimiento y las capacidades de equilibrio de carga, optimización del rendimiento RACH y mejorar el ahorro energético.
- El apoyo de doble capa de formación de haz para mejorar las tasas de pico, cuando se halla en el modo de formación de haz.
- Adaptación de la tasa de vocoder basado en la carga de células.
- Mejoras en la arquitectura en apoyo del Nodo B/eNodo B.
- Mejoras en los servicios centralizados y continuidad de servicio IMS.
- Mejoras para M2M, femtoceldas y NFC.

En septiembre de 2009, los socios del 3GPP hicieron una presentación formal ante la UIT y propusieron que el módulo LTE Rel-10 y más allá se evaluase como un candidato para las IMT-Avanzadas. En cuanto a la Rel-8, las principales características de LTE son:

Alta eficiencia espectral

- OFDMA en el enlace descendente, técnica de acceso múltiple robusta frente a interferencias múltiples y de alta afinidad a las técnicas avanzadas como la propagación del canal en el dominio de la frecuencia y MIMO.
- SC-OFDMA en el enlace ascendente, PAPR baja, la ortogonalidad del usuario en el dominio de la frecuencia.
- MIMO soporte de antenas con canales de transmisión múltiples.

Muy baja latencia:

- Reducción del tiempo de preparación y transferencia.
- Corta latencia HO y tiempo de interrupción.
- Reducción del TTI.
- Simplificación de estados RRC.

Soporte de ancho de banda variable:

- 1,25 – 3 – 5- 10 – 15 y 20 MHz.

Arquitectura de protocolo simple:

- Compartición de canales.
- Solo modo paquetes con capacidad de VoIP.

Arquitectura sencilla

- ENodo B como único nodo E-UTRAN.
- Menor número de interfaces de RAN: eNodo B – MME/SAE – Gateway (S1), eNodo B – Enodo B (X2).
- Compatibilidad e interoperabilidad con las versiones 3GPP anteriores.
- Introducción de la funcionalidad de autoconfiguración y optimización (SON).

Los objetivos de velocidad de LTE, (100 Mbit/s en el descendente y 50 Mbit/s en el ascendente) son diferentes dependiendo de las distintas configuraciones de antenas y modulaciones, tal como se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4. 1: Velocidades de LTE con diferentes configuraciones de antenas y modulaciones.

FDD. Velocidad de pico de bajada (64 QAM)			
Configuración de Antena	SISO	2x2 MIMO	4x4 MIMO
Velocidad de pico en Mbit/s	100	172,8	326,4
FDD. Velocidad de pico en subida (antena única)			
Técnica de modulación	QPSK	16QAM	64QAM
Velocidad de pico en Mbit/s	50	57,6	86,4

Fuente: Comunicaciones Móviles, Sistemas GSM, UMTS y LTE [29]

Además, LTE debe complementar los reglamentos y la disponibilidad de espectro tanto a nivel internacional como local. Con este fin, las especificaciones incluyen ancho de banda variable del canal, seleccionable desde 1,25 hasta 20MHz, con una separación entre subportadoras de 15kHz.

El espaciamiento de subportadora es constante, independientemente del ancho de banda del canal. El 3GPP ha definido la interfaz aire LTE con capacidad para adaptarse a

diferentes anchos de banda con un impacto mínimo sobre el funcionamiento del sistema. Se han definido modos TDD y FDD para soportar banda de frecuencias tanto asimétricas como simétricas.

Mejoras de LTE-ADVANCED

A partir de la arquitectura de red definida en la Release 99, mantenida sin cambios en Release 4, el 3GPP comenzó con la Release 5 la introducción de los protocolos IP como base en el transporte de red, posibilitando la creación de infraestructura 3G sobre redes IP, como sustituto a las redes basadas en ATM. El sistema LTE, y su sucesor LTE-Advanced, son sistemas basados en all IP.

De las múltiples tecnologías empleadas en los equipos Long Term Evolution, tanto en LTE como en LTE-Advanced, merece la pena destacar:

- Flexibilidad del uso del espectro: ancho de banda flexible, FDD/TDD.
- Acceso de radio: OFDMA para el downlink y SC-FDMA para el uplink.
- Tecnología multi-antena: antenas inteligentes MIMO.
- Funciones de “relay”: comunicaciones del UE con la red vía un RN.
- Agregación de portadoras: para aumentar el ancho de banda.
- LTE-Advanced es el sistema definido por el 3GPP (como evolución de LTE) que cumple los requisitos del IMT- Advanced, considerándose por ello la verdadera tecnología 4G. Ha sido definido en el Release 10 del 3GPP LTE Rel-10 y está destinado a satisfacer los diversos requisitos de las aplicaciones avanzadas que sean comunes en el mercado inalámbrico en el futuro previsible.
- Entre las principales funcionalidades de LTE-Advanced están: Agregación de portadoras (CA, Carrier Aggregation), mejoras en la cobertura y facilitar el despliegue, MIMO mejorado, SON mejorado, CoMP y redes heterogéneas.[29]

4.2 Clasificación de los modelos de propagación

Método Lee

Lee ha propuesto un modelo que, basado en la fórmula de tierra plana y mediciones experimentales, proporciona la potencia recibida en dBm para dos tipos de entornos:

suburbano y urbano. En este último caso, se facilitan expresiones para tres ciudades típicas.

El modelo toma como referencia los siguientes parámetros y valores:

- Altura de la antena de transmisión $h_t = 100\text{pies} \Rightarrow 30,5\text{m}$
- Altura de la antena de recepción: $h_r = 10\text{pies} \Rightarrow 3\text{m}$.
- Potencia de transmisión $p_t = 10\text{W} \Rightarrow 40\text{dBm}$
- Ganancia de antena de transmisión $G_{td} = 4 \Rightarrow 6\text{dBd}$.
- Ganancia de antena de recepción: $G_{rd} = 1 \Rightarrow 0\text{dBd}$.
- Frecuencia $f = 900\text{MHz}$.

Método Okumura – Hata

Para aplicaciones de radiocomunicaciones móviles, Okumura obtuvo unas curvas estándar de propagación, sobre la base de una amplia campaña de medidas efectuadas en Japón. Estas curvas proporcionan valores de la intensidad de campo para medio urbano, diferentes alturas efectivas de antenas, bandas de 150, 450 y 900 MHz y una PRA de 1kW. La altura de la antena de recepción es 1,5m., valor típico en aplicaciones móviles.

Acompañan a las curvas correcciones para tener en cuenta los efectos de ondulación (Δh), pendiente y heterogeneidad del terreno (trayectos mistos tierra/mar), presencia de obstáculos significativos, altura de la antena receptora, potencia radiada aparente y, en caso de zonas urbanas, orientación de calles y densidad de edificación. El método de Okumura es muy prolijo y, en algunos aspectos, subjetivo, pero proporciona resultados bastantes acordes con las mediciones, por lo que viene siendo utilizado por numerosos usuarios de diferentes países.

La convivencia de informatizar el método condujo a Hata al desarrollo expresiones numéricas para las curvas de propagación de Okumura, incluyendo, además, las correcciones más usuales utilizadas en las radiocomunicaciones móviles. Hata obtuvo, mediante el análisis de regresión múltiple, una serie de expresiones que proporcionan la pérdida básica de propagación, L_b , para medios urbanos, suburbanos y rurales.

La fórmula fundamental de Hata, que proporciona L_b en un medio urbano, y sirve de referencia para los demás entornos de propagación, es la siguiente:

$$L_b = 69,55 + 26,26 \log f - 13,82 h_t - a(h_m) + (44,9 - 6,55 \log h_t) \log d \quad (3)$$

f: Frecuencia, MHz, en la gama $150 \leq f \leq 1.500$ MHz

h_t : Altura efectiva de la antena transmisora (m), en la gama $30 \leq h_t \leq 200$ m.

h_m : Altura sobre el suelo de la antena receptora (m) en la gama $1 \leq h_m \leq 10$ m.

a(h_m): Corrección por altura h_m .

La fórmula de Hata está especialmente concebida para aplicaciones a radiocomunicaciones móviles.

Método de Sakagami-Kuboi (SK)

El modelo SK ha sido desarrollado en Japón para su aplicación a entornos urbanos. Requiere información muy detallada del entorno del móvil y tiene validez para las frecuencias de 900 y 1800 MHz. La concordancia con resultados de mediciones es muy buena.

$$L_b = 100 - 7,1 \log W + 0,023\varphi + 1,4 \log h_s + 6,1 \log < H > - \{24,37 - 3,7(H/h_{b0})^2\} \log h_b + (43,2 - 3,1 \log h_b) \log d + 20 \log f + \exp\{13(\log f - 3,23)\} \quad (4)$$

Donde:

W: Anchura de la calle donde está el móvil (5 a 50 m).

φ : Ángulo entre la dirección móvil-base y el eje de la calle (0-90°).

h_s : Altura de los edificios próximos al móvil (5-8m)

< H >: Altura media de los edificios alrededor del punto de recepción (5-50).

h_{b0} : Altura de la antena de estación base sobre el suelo (m).

h_b : Altura de la antena de estación base respecto al punto de recepción (20-100).

H: Altura media de los edificios alrededor de la estación base ($H \leq h_{b0}$).

d: distancia estación base-móvil (0,5-10).

f: frecuencia (450-2.200MHz).

El gran número de datos que requiere este modelo solo lo hace útil cuando dispone de mapas urbanos digitalizados de donde puedan evaluarse.

Método de Ikegami

Ikegami ha propuesto un modelo para el cálculo de la potencia media en un sistema de radiocomunicaciones móviles en zona urbana cuyas predicciones concuerdan en gran manera con los resultados experimentales y las predicciones empíricas convencionales.

El modelo, basado en la teoría de rayos y óptica geométrica, supone una estructura ideal de la ciudad con alturas uniformes de los edificios. También tiene en cuenta la orientación de las calles y la altura de la estación móvil, la frecuencia, la altura de la estación base y la distancia.

En el modelo los componentes de multitrayecto se dividen en dos grupos: rayos principales y rayos secundarios. Como, en general, los rayos principales tienen mucha mayor amplitud que los secundarios, las características de propagación se podrán determinar considerando únicamente estas componentes.

Y, en efecto, según experimentos realizados, se observa que los rayos que llegan al receptor con una sola difracción y una única reflexión son mucho más importantes, en la mayoría de los casos, que los que lo hacen con múltiples difracciones y reflexiones, los cuales experimentan una gran atenuación.

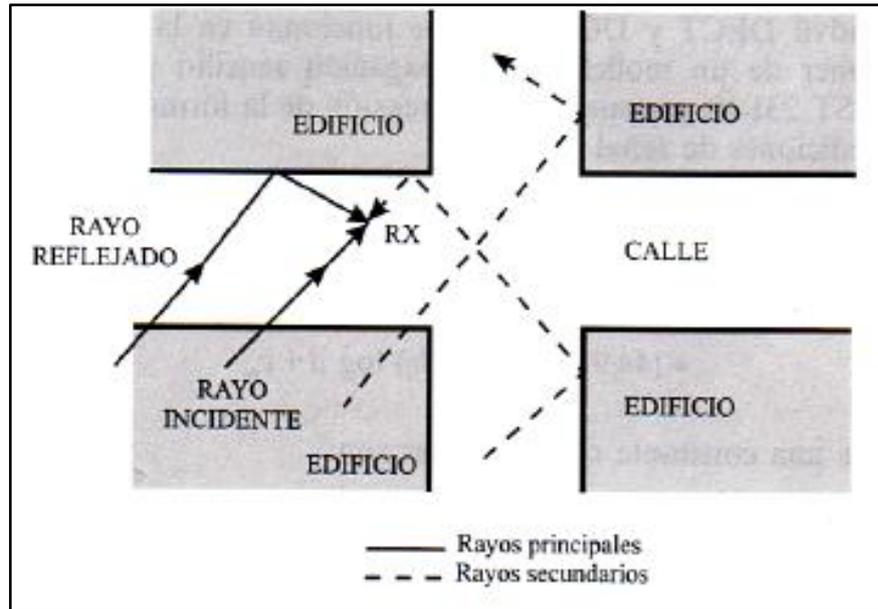


Fig.4. 1: Difracción y Reflexión.

Fuente: Comunicaciones Móviles [30]

Método de Walfish- Bertoni

Este modelo tiene en cuenta la influencia del conjunto de edificios que se interponen entre el transmisor y el móvil receptor. De este modo, el principal inconveniente del método Ikegami. Puede aplicarse para alturas de antena transmisora no muy elevadas, pero por encima de los edificios próximos.

El modelo tiene en cuenta que las ondas principales que desde la antena de transmisión T llegan al punto P en el tejado del edificio próximo al móvil, experimentarán una pérdida por difracción debido a la proximidad entre el rayo TP y los edificios existentes entre T y P. El conjunto de estos edificios se modela como múltiples pantallas difractoras separadas entre sí una distancia constante igual a b (separación media entre edificios). Desde P los rayos principales que alcanzan el reflector son el PR, difractando en P, y el PQR difractado en P y reflejado en Q.

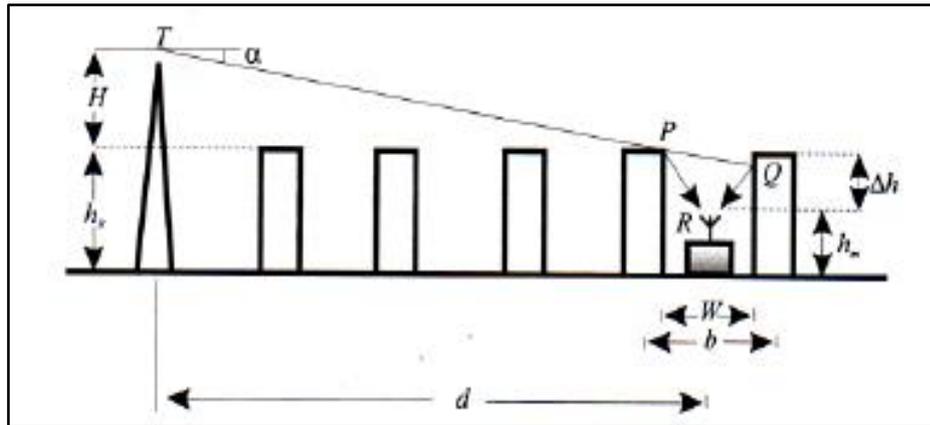


Fig.4. 2: Método Walfish-Ikegami.
Fuente: Comunicaciones Móviles [30]

Modelos COST-231 Walfish-Ikegami

Este modelo fue propuesto por el grupo europeo de trabajo COST-231 con objeto de mejorar las predicciones que se obtienen por otros métodos. El modelo propuesto es una combinación de los de Walfish e Ikegami y está basado en los diferentes estudios llevados a cabo por miembros del mencionado grupo. Resulta aplicable a los siguientes entornos:

Celdas grandes y pequeñas: La antena de la estación base se sitúa por encima de los tejados de los edificios, cercanos al móvil.

Microceldas: la estación base está situada por debajo de los tejados de los edificios, estando entonces determinada la propagación por la difracción y la dispersión en los tejados de los edificios, es decir, los rayos principales se propagan en las calles de modo similar a como lo harían en una guía de ondas.

En el primer caso, la geometría del modelo COST-231 es la misma que la del Walfish-Bertoni, con la diferencia de que intervienen además la anchura de la calle W y el ángulo de la calle con la dirección de propagación θ , como en el modelo Ikegami.

La atenuación que propone el método consta de tres términos:

$$L_b = L_0 + L_{rts} + L_{msd} \quad (5)$$

El primer término representa la pérdida en espacio libre L_0 , el segundo las pérdidas por difracción y dispersión del tejado a la calle L_{rts} y el tercero la pérdida por difracción multipantalla L_{msd} , todas ellas en dB.

Las pérdidas por difracción y dispersión del tejado a la calle vienen dadas por:

$$L_{rts} = -16,9 - 10\log W + 10\log f + 20\log \Delta h_R + L_{ori} \quad (6)$$

Donde $\Delta h_R = h_R - h_m$ y L_{ori} son las pérdidas debidas a la orientación de la calle:

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,3571\phi & 0 \leq \phi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\phi - 35) & 35 \leq \phi < 55^\circ \\ 4 - 0,114(\phi - 55) & 55 \leq \phi < 90^\circ \end{cases} \quad (7)$$

El valor de L_{ori} tiene en cuenta el ángulo ϕ entre el rayo directo y el eje de la calle. Si el valor de L_{rts} es menor de cero $L_{rts}=0$.

Las pérdidas multipantalla, que al igual que las anteriores se hacen cero cuando son negativas, se obtienen a partir de la siguiente ecuación:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d + k_f \log f - 9 \log b \quad (8)$$

Los parámetros que intervienen en esta expresión se calculan como sigue:

$$L_{bsh} = -18 \log(1 + \Delta h_B) \quad \text{donde } \Delta h_B = h_B - h_R \quad (9)$$

Si $\Delta h_B < 0$, $L_{bsh} = 0$

En cuanto a las constantes k_a y k_b se pueden obtener a partir de:

$$k_a = \begin{cases} 54 & \Delta h_B \geq 0 \\ 54 - 0,8 \Delta h_B & \Delta h_B < 0 \text{ y } d \geq 0,5 \\ 54 - 1,6 \Delta h_B d & \Delta h_B < 0 \text{ y } d < 0,5 \\ 18 & \Delta h_B \geq 0 \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_B}{h_R} & \Delta h_B < 0 \end{cases} \quad (10)$$

Para la constante k_f se hace la distinción de ciudades grandes y medianas, así en el caso de ciudades de tamaño medio y centro suburbano con densidad moderada de vegetación:

$$k_f = -4 + 0,7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad (11)$$

Mientras que para grandes centros metropolitanos el valor de k_f es:

$$k_f = -4 + 1,5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad (12)$$

En estas ecuaciones el término k_a representa el incremento de pérdidas de propagación en el caso en que las antenas de las estaciones base estén por debajo de los tejados de los edificios adyacentes y los coeficientes k_d y k_f ajustan la dependencia de la difracción en función de la distancia y la frecuencia.

Altura de los edificios $h_R = 3$ número de pisos.

Separación entre edificios $b = 20-50m$.

Anchura de la calle $W = b/2$.

Orientación de la calle con respecto al rayo directo de propagación.

Cuando desde la antena de la estación bases hay visibilidad a lo largo de una calle, la propagación tiene lugar según un modo tipo guía de onda. El método COST 231 proporciona la siguiente expresión de la pérdida básica de propagación para estos casos:

$$L_b = 42,5 + 26 \log d + 20 \log f \quad (13) \quad d \geq 20m$$

La constante 42.6 se ha fijado de forma que L_b sea igual a la pérdida en espacio libre para $d=20m$ (d, km y f, MHz).

4.3 Distribuciones Estadísticas de la Propagación Radioeléctrica

En los enlaces zonales, como son los de comunicaciones móviles, las ondas que llegan a diferentes posiciones en que puede situarse el receptor encuentran distintas condiciones de propagación en su camino. Además, la señal recibida por el móvil suele ser el resultado de la suma de componentes que se propagan por múltiples trayectos. En consecuencia, las comunicaciones móviles se caracterizan por amplias variaciones del campo en función del espacio (variaciones con la ubicación del receptor) y en función del tiempo (variaciones temporales). Las variaciones de campo se asocian a distintos modelos de desvanecimiento y se describen mediante diferentes distribuciones estadísticas.

Distribución normal de campo

En condiciones de desvanecimiento lento, la variación de la intensidad de campo (en dBu), con las ubicaciones puede representarse por una distribución normal o gaussiana con una media \bar{E} y una desviación σ_L , cuya función de densidad de probabilidad es:

$$f(E) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{E - \bar{E}}{\sigma_L} \right)^2 \right] \quad (14)$$

donde \bar{E} es también el valor mediano del campo. La desviación típica σ_L depende de la frecuencia y de la extensión e irregularidad del terreno. Para aplicaciones de PMR en las que la cobertura por estación base es relativamente grande, el informe UIT-R RPN 358, facilita los siguientes valores para terrenos medianamente ondulados:

- Bandas de 150-200 MHz: 8dB
- Banda de 450 MHz: 10dB

Para aplicaciones de PMT en las que el radio celular es pequeño, la recomendación GSM 03.30 proporciona para la banda de 900 MHz, el valor $\sigma = 7dB$.

En estudios de calidad de enlaces resulta necesario calcular la probabilidad de corte de un enlace que se produce cuando el valor del campo es inferior a un cierto umbral E_u . Su complementaria es la probabilidad de cobertura. Estas probabilidades se representan mediante las funciones de distribución, particularizadas para E_u .

$$P_{corte} = F(E_u) = Prob(E \leq E_u) \quad (15)$$

$$P_{cobert} = G(E_u) = Prob(E > E_u) = 1 - P_{corte} \quad (16)$$

donde F y G son las funciones de distribución acumulativa y complementaria, respectivamente, de la variable gaussiana E, que se evalúan tipificando dicha variable mediante el cambio:

$$t = \frac{E - E_u}{\sigma_L} \quad (17)$$

En radiocomunicaciones se utiliza la distribución de Rayleigh para describir la variación estadística de la envolvente de la señal resultante de la propagación multitrayecto, cuando los diferentes rayos tienen amplitudes similares y fases aleatorias.

Si denominamos r a esa envolvente (amplitud), la función de densidad de probabilidad es:

$$p(r) = \frac{r}{b} \exp \left(-\frac{r^2}{2b} \right) \quad (r \geq 0) \quad (18)$$

La función es uniparamétrica, $b = \frac{\bar{r}^2}{2}$ con parámetro mitad del valor cuadrático medio r .

La mediana de la distribución es: $\bar{r} = 1,18\sqrt{b}$.

La probabilidad de rebasar un valor dado r_0 viene dada por la función de distribución complementaria:

$$G(r_0) = \exp \left[-0,693 \left(\frac{r_0}{\bar{r}} \right)^2 \right] \quad (19)$$

Si se utiliza un papel Rayleigh, como en la figura, esta función viene representada por una línea recta. En ordenadas se lee la probabilidad de rebasar los valores indicados en abscisas en forma logarítmica respecto de la mediana ($20 \log \frac{r}{\bar{r}}$). La recta pasa por el punto 0dB ($r = \bar{r}$) y 50 %. Por ejemplo, la probabilidad de rebasar un valor a -8,2 dB respecto de la mediana es del 90% (decibelio inferior) y la de rebasar un valor a 5,2 dB respecto de la mediana es 10% (decibelio superior).

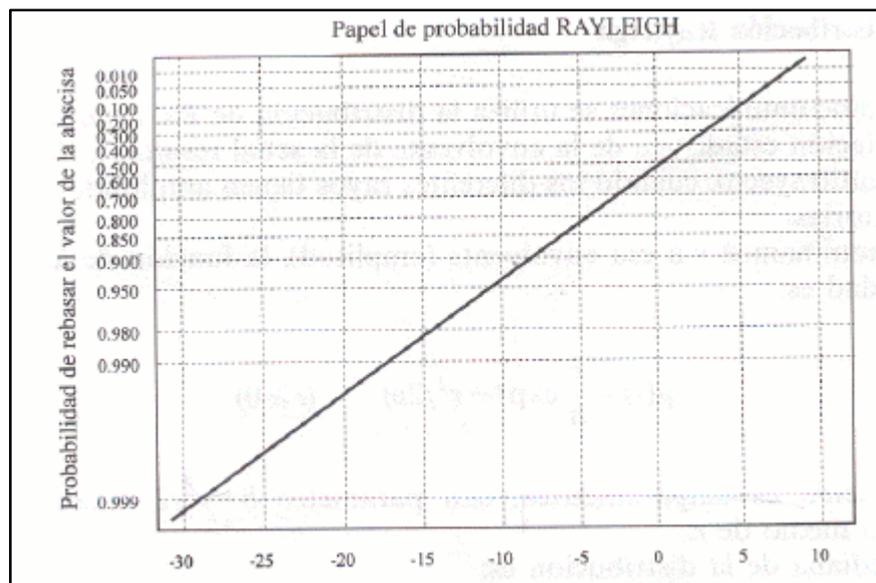


Fig.4. 3: Papel de Rayleigh.
Fuente: Comunicaciones Móviles [30]

La potencia $p = r^2/2$ de la señal de multitrayecto de envolvente r se distribuye según una ley exponencial negativa, con una densidad de probabilidad

$$f(p) = \frac{\ln 2}{\bar{p}} \exp \left[-0,693 \cdot \frac{p}{\bar{p}} \right] \quad p > 0 \quad (20)$$

donde $\tilde{p} = \widetilde{r^2}$ es la potencia mediana.

La función de distribución es:

$$F(p) = 1 - \exp\left(-\frac{p \cdot \ln 2}{\tilde{p}}\right) \quad (21)$$

Si se desea poner $F(p)$ en función del valor medio de la potencia $\tilde{p} = b$, resulta:

$$F(p) = 1 - \exp\left(-\frac{p}{\tilde{p}}\right) \quad (22)$$

ya que la relación entre los valores medio y mediano de la potencia es

$$\tilde{p} = \frac{\tilde{p}}{\ln 2} \quad (23)$$

Distribución de Rayleigh + Log-Normal (RLN)

En algunas aplicaciones, sobre todo en radiocomunicaciones móviles en medios urbanos, el campo a lo largo de una zona (por ejemplo, una calle) sigue una ley de Rayleigh con una media variable que se distribuye de unas zonas a otras según una log-normal. La formalización matemática de esta ley mixta es la siguiente:

Sea p una variable aleatoria que representa la variación de la potencia de una señal multitrayecto que, en cierto entorno, se distribuye según una ley exponencial negativa. La función de distribución complementaria, será:

$$G_p(p) = \exp\left(-\frac{p}{\bar{p}}\right) \quad (24)$$

A la medida \bar{p} se la denomina media local y es constante en un pequeño recorrido (8 ~ 12 m de la calle). Esta medida varía, a su vez, de unos lugares a otros, siguiendo una distribución log-normal. Sea $\bar{\bar{p}}$ la medida de \bar{p} en un largo recorrido. A $\bar{\bar{p}}$ se le llama media sectorial.

$$f_{\bar{p}}(\bar{p}) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi \bar{p}}} \exp\left\{-\frac{\left[\ln\left(\frac{\bar{p}}{\bar{\bar{p}}}\right)\right]^2}{2\sigma_n^2}\right\} \quad (25)$$

La distribución global de p será mixta, Rayleigh + log-normal (RLN), con una función de distribución complementaria dada por:

$$G(p) = \int_0^{\infty} G_p\left(\frac{p}{\bar{p}}\right) f_p(\bar{p}) d\bar{p} = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \frac{1}{\bar{p}} \exp\left(-\frac{p}{\bar{p}}\right) \exp\left\{-\frac{\left[\ln\left(\frac{p}{\bar{p}}\right)\right]^2}{2\sigma_n^2}\right\} d\bar{p} \quad (26)$$

Si hacemos $x = \left(\frac{p}{\bar{p}}\right)$, queda:

$$G(p) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \frac{1}{x} \exp\left(-\frac{p}{\bar{p} \cdot x}\right) \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x}{\sigma_n}\right)^2\right\} dx \quad (27)$$

Esta integral no es expresable mediante funciones elementales, debiendo evaluarse por procedimientos de cálculo numérico.

Distribución Nakagami-Rice

Se utiliza esta distribución para la descripción estadística de las variaciones de intensidad de una señal constituida por una componente determinística y varias componentes aleatorias, situación que se produce, típicamente, en los sistemas de comunicaciones móviles cuando hay un trayecto dominante despejado (LOS, de visión directa) y multitrayectos con dispersión (NLOS).

La función de densidad de probabilidad es biparamétrica, y se expresa por:

$$p(r) = \frac{r}{b} \exp[-(r^2 + c^2)/2b] I_0\left(\frac{cr}{b}\right) \quad (28)$$

Donde:

2b: valor cuadrático medio de la componente aleatoria (señal multitrayecto).

c: valor eficaz de la componente determinística (señal directa).

I_0 función de Bessel modificada de primera especie y orden cero.

A veces se expresa la distribución de Rice en función del parámetro k definido como el cociente entre la potencia de las componentes dispersas NLOS. Resulta:

$$k = \frac{c^2}{2b} \quad (29)$$

que es gaussiana, en un entorno de $r=c$ con media $\bar{r} = c$ y desviación típica $\sigma = \sqrt{b}$. esto es así porque la componente de multitrayecto es muy pequeña. [30]

4.4 Ventajas de LTE

- Permite proporcionar una conexión de banda ancha móvil con altas velocidades de transmisión para el enlace de bajada y subida, se puede obtener velocidades pico de 100 y 50 Mbps respectivamente.
- Posibilidad de utilizar servicio 4G en lugares donde antes no existía cobertura.
- Compatibilidad para trabajar en conjunto con otros sistemas de telefonía móvil.
- Capacidad del sistema para efectuar videoconferencias sin retardo en la conexión así como transferir imágenes y vídeos en alta resolución.
- LTE utiliza frecuencias bajas lo que hace posible un mejor uso del espectro radioeléctrico y mayor cobertura. [31]

4.5 Desarrollo de la simulación

4.5.1 Diagrama de flujo

La interfaz de usuario de Matlab se rige a un diagrama de flujo, para el control de las operaciones a realizarse es decir es el código que se va a programar.

La figura 4.4 muestra el proceso de construcción de nuestro programa mediante el diagrama de flujo el mismo que es puesto en práctica en la realización de esta simulación.

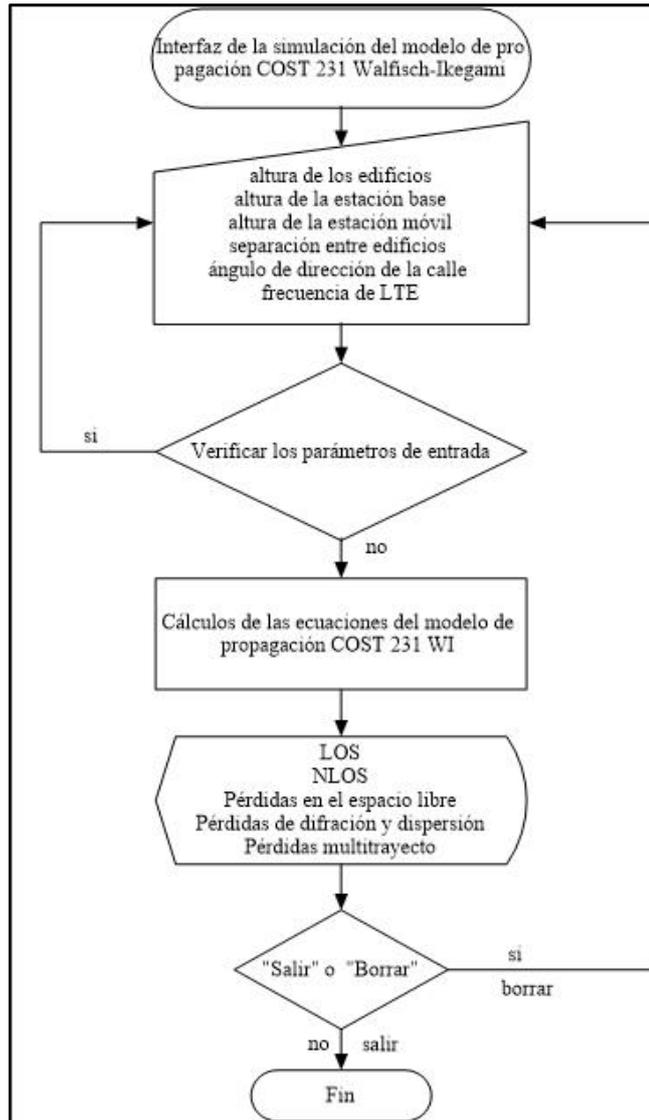


Fig.4. 4: Diagrama de Flujo.
Fuente: Investigadora

4.5.2 Programación

En esta parte se presenta la programación de la carátula de la simulación y de las ecuaciones que forman parte del modelo de propagación COST 231 WALFISCH-IKEGAMI así como de sus gráficas y los parámetros de entrada para el desarrollo de este trabajo.

```

function varargout = tesis(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @tesis_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @tesis_OutputFcn, ...

```

```

        'gui_LayoutFcn', [], ...
        'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if narginout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
% --- Executes just before tesis is made visible.
function tesis_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
axes(handles.axes1)
background = imread('escudo uta.jpg');
axis off;
imshow(background);
axes(handles.axes2)
background = imread('Captura.jpg');
axis off;
imshow(background);
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
function varargout = tesis_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;
function presentacion_Callback(hObject, eventdata, handles)
function presentacion_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on button press in simulacion.
function simulacion_Callback(hObject, eventdata, handles)
cost;

```

Se genera un archivo .m en el cuál se realiza toda la programación es decir ingreso y salida de datos así como de ecuaciones, el archivo es guardado con el nombre de tesis.

Esta parte de la programación hace referencia a la presentación del proyecto se inicia colocando un static text en el GUI en blanco en el cual se escribe todo lo perteneciente a la carátula.

En el archivo .m se crea una función tesis_OpeningFcn en la cual programamos los axes para que aparezcan las imágenes utilizando comandos como imread que sirven para

llamar a la imagen desde la carpeta que se encuentre ubicada y el comando `imshow` es para mostrar la imagen en el GUI cuando se ejecuta.

Se coloca un botón con el nombre de simulación y se crea la función `simulacion_Callback` la cual nos permite abrir otro GUI en el que se encuentra la programación del modelo de propagación.

```
function varargout = cost(varargin)
%
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @cost_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @cost_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [] , ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
function Borrar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to Borrar (see GCBO)
set(handles.edificios,'String','');
set(handles.base,'String','')
set(handles.movil,'String','')
set(handles.separacion,'String','')
set(handles.text138,'String','b/2');
set(handles.distancia,'String','')
set(handles.angulo,'String','')
set(handles.atenuacion,'String','');
set(handles.difraccion,'String','');
set(handles.multipantalla,'String','');
set(handles.espacio,'String','');
set(handles.vista,'String','');
set(handles.text131,'String','');
set(handles.text132,'String','');
set(handles.text133,'String','');
set(handles.text134,'String','');
set(handles.text135,'String','')
set(handles.frecuencia,'String','');
axes(handles.axes1);
plot([0 1], [0.1]);
axes(handles.axes2);
plot([0 1], [0.1]);

% --- Executes on button press in calcular.
function calcular_Callback(hObject, eventdata, handles)
hr = str2double(get(handles.edificios,'String'));
hb = str2double(get(handles.base,'String'));
```

```

hm = str2double(get(handles.movil,'String'));
d= str2double(get(handles.distancia,'String'));
b= str2double(get(handles.separacion,'String'));
fi= str2double(get(handles.angulo,'String'));
f=str2double(get(handles.frecuencia,'String'));
Los=42.6+26*log10(d)+20*log10(f);
set (handles.vista,'String',Los);
set (handles.text131,'String',Los)
%Sin línea de vista
L0=32.5+20*log10(d)+20*log10(f);
vhr=hr-hm;
if (fi>=0)&&(fi<35)
    Lori=-10+0.3571*fi;
elseif (fi >= 35)&& (fi <55 )
    Lori= 2.5+0.075*(fi-35);
elseif (fi >=55)&&(fi<90)
    Lori=4-0.114*(fi-55);
end
w = b/2;
set (handles.text138,'String',w);
Lrts = -16.9-10*log10(w)+10*log10(f)+20*log10(vhr)+Lori;
if Lrts <=0
    Lrts =0;
end
%Pérdidas multipantalla
vhb=hb-hr;
Lbsh=-18*log10(1+vhb);
if (vhb < 0)
    Lbsh=0;
end
%ka
if (vhb >=0)
    ka=54;
elseif (vhb<0)&&(d>=0.5)
    ka=54-(0.8*vhb);
elseif (vhb <0)&&(d<0.5)
    ka=54-(1.6*vhb*d);
end
%kd
if (vhb>=0)
    kd=18;
else (vhb<0)
    kd=18-15*(vhb/hr);
end
kf=-4+(0.7*((f/925)-1));
Lmsd=Lbsh+ka+kd*log10(d)+kf*log10(f)-9*log10(b);
Lb=L0+Lrts+Lmsd;

```

```

kf1=-4+(1.5*((f/925)-1));
Lmsd1=Lbsh+ka+kd*log10(d)+kf1*log10(f)-9*log10(b);
Lb1=L0+Lrts+Lmsd1;
%Resultados
set(handles.atenuacion,'String',Lb);
set (handles.difraccion,'String',Lrts);
set (handles.multipantalla,'String',Lmsd);
set (handles.espacio,'String',L0);
set(handles.text132,'String',Lb1);
set (handles.text133,'String',Lrts);
set (handles.text134,'String',Lmsd1);
set (handles.text135,'String',L0);
function graficar_Callback(hObject, eventdata, handles)
hr = str2double(get(handles.edificios,'String'));
hb = str2double(get(handles.base,'String'));
hm = str2double(get(handles.movil,'String'));
d= str2double(get(handles.distancia,'String'));
b= str2double(get(handles.separacion,'String'));
fi= str2double(get(handles.angulo,'String'));
f=str2double(get(handles.frecuencia,'String'));
d1=0:0.01:d;
Los=42.6+26*log10(d1)+20*log10(f);
L0=32.5+20*log10(d1)+20*log10(f);
vhr=hr-hm;
if (fi>=0)&&(fi<35)
    Lori=-10+0.3571*fi;
elseif (fi >= 35)&& (fi <55 )
    Lori= 2.5+0.075*(fi-35);
elseif (fi >=55)&&(fi<90)
    Lori=4-0.114*(fi-55);
end
w = b/2;
Lrts= -16.9-10*log10(w)+10*log10(f)+20*log10(vhr)+Lori;
if Lrts <=0
    Lrts =0;
end
%Pérdidas multipantalla
vhb=hb-hr;
Lbsh=-18*log10(1+vhb);
if (vhb < 0)
    Lbsh=0;
end
%ka

if (vhb >=0)
    ka=54;
elseif (vhb<0)&&(d>=0.5)
    ka=54-(0.8*vhb);

```

```

elseif (vhb <0)&&(d<0.5)
    ka=54-(1.6*vhb*d);
end
%kd
kd=18;
else (vhb<0)
    kd=18-15*(vhb/hr);
end
kf=-4+(0.7*((f/925)-1));
Lmsd=Lbsh+ka+kd*log10(d1)+kf*log10(f)-9*log10(b);
Lb=L0+Lrts+Lmsd;
kf1=-4+(1.5*((f/925)-1));
Lmsd1=Lbsh+ka+kd*log10(d1)+kf1*log10(f)-9*log10(b);
Lb1=L0+Lrts+Lmsd1;
axes(handles.axes1);
plot(d1,Los,d1,Lb,d1,Lb1);
grid off;
xlabel('Distancia [km]');
ylabel('Pérdidas [dB]');
title('Pérdidas vs. Distancia');
legend('LOS C.G. y C.M.', 'NLOS C.G.', 'NLOS C.M');

```

En la función `Borrar_Callback` se programó para que todos los datos de entrada se regresen a cero al momento de presionar el botón borrar.

En `calcular_Callback` se encuentra la inicialización de los parámetros de entrada de la simulación, se programó las ecuaciones que se encuentra en el modelo de propagación tomando en cuenta las condiciones que se presenta en el mismo y los resultados que se obtendrían al resolverse las ecuaciones como lo serian pérdidas en el espacio libre, multitrayecto, sin línea de vista, con línea de vista y por difracción y reflexión.

Para las gráficas que se encuentran en la función `graficar_Callback` se programaron los axes añadiéndoles título, leyenda, nombre al eje x y al eje y así como el tamaño de su longitud.

También nos presenta la gráfica de pérdidas en función de la frecuencia y también en función de la distancia las cuales se ejecutan al presionar los botones que llevan el mismo nombre.

4.5.3 Descripción de la simulación

Con la simulación se pretende analizar y comprobar las predicciones de la pérdida de trayecto de la señal.

La simulación se diseñó para facilitar el comportamiento de dicho modelo de propagación ante la variación de parámetros como frecuencia, altura media de los edificios, separación entre edificios, anchura de la calle, ángulo de la calle, altura de la estación base, altura de la antena móvil, distancia entre los edificios.

Los parámetros mencionados anteriormente son utilizados para los cálculos de la atenuación cuando existe visibilidad directa.

En cambio para el cálculo de las pérdidas cuando no existe línea de vista los parámetros que intervienen son la distancia y la frecuencia.

En este modelo de propagación se incorpora la influencia de edificaciones y calles en las que se encuentra el receptor, para una predicción más precisa de las pérdidas de propagación en entornos urbanos.

También presenta una ecuación que hace distinción entre ciudades grandes y medianas así como para grandes centros metropolitanos.

4.5.4 Presentación de la simulación

Para empezar con la simulación se debe abrir el programa Matlab el cual dispone de GUIDE una interfaz gráfica.

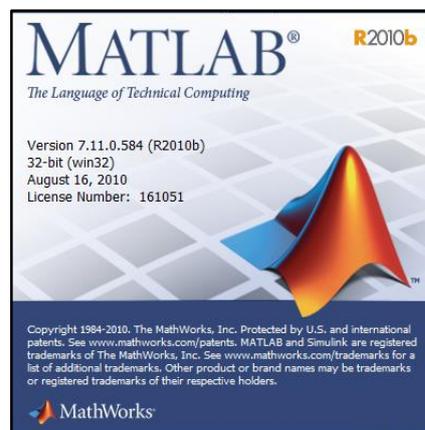


Fig.4. 5: Ingreso a Matlab.

Fuente: Investigadora

Para ello se escribe el comando `guide` o se hace clic sobre su icono en el entorno de desarrollo de Matlab.

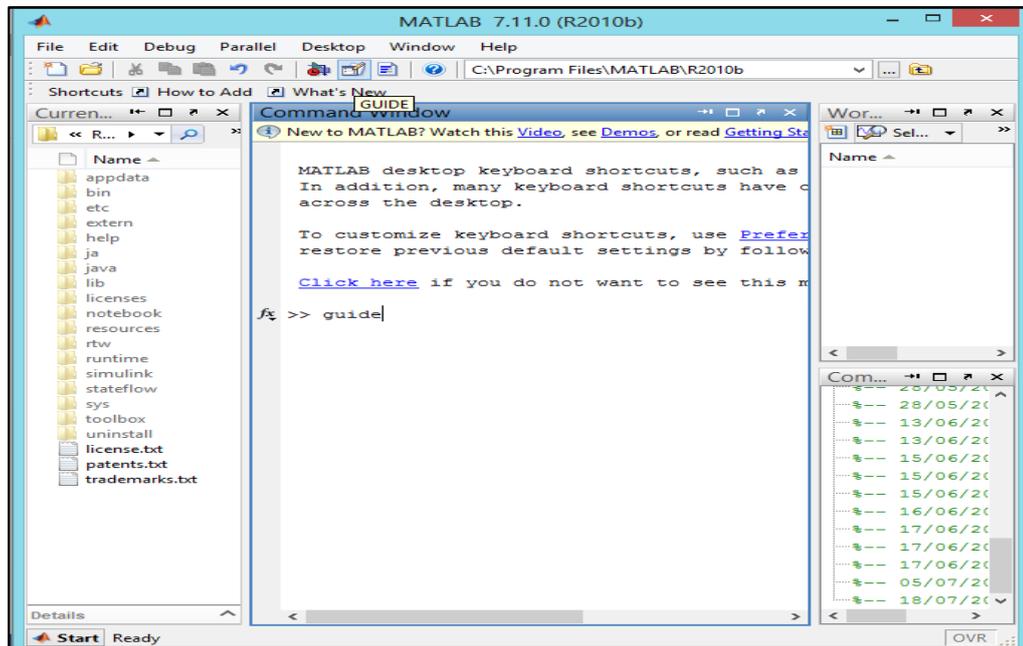


Fig.4. 6: Abrir GUIDE
Fuente: Investigadora

Aparece una ventana para abrir GUIs existentes pero en este caso creamos un GUI en blanco.

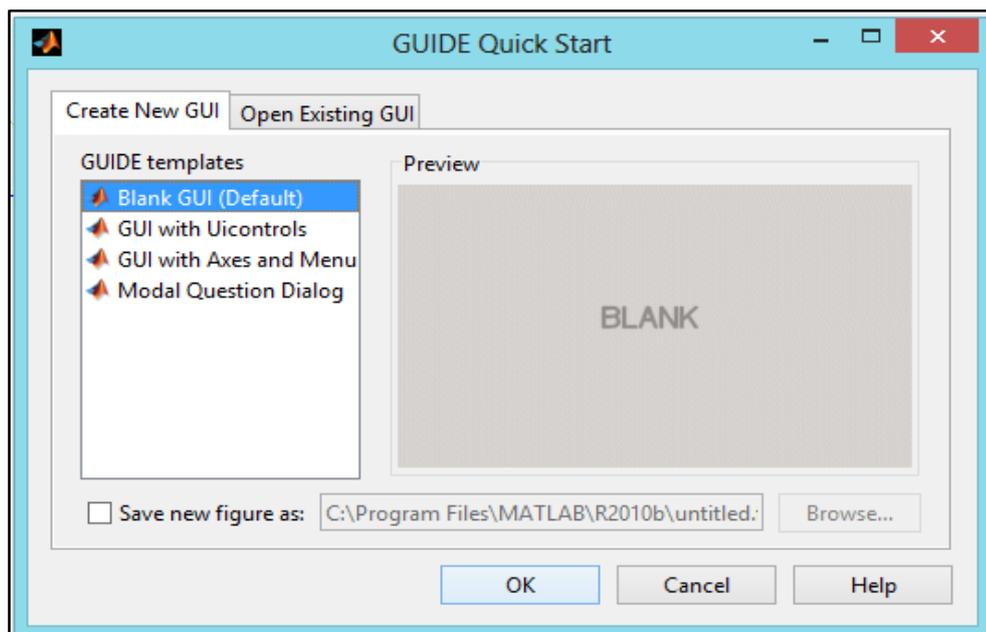


Fig.4. 7: Crear un nuevo GUI
Fuente: Investigadora

Aparece una ventana en blanco para el desarrollo del proyecto.

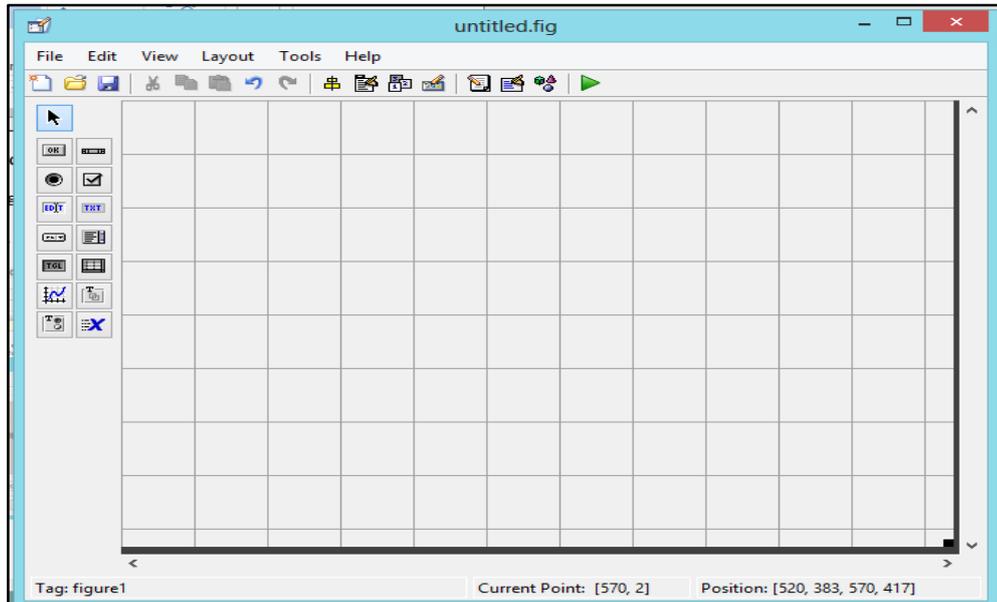


Fig.4. 8: GUI en blanco
Fuente: Investigadora

En la figura 4.9 se realiza la presentación del proyecto.

Para la carátula de la simulación se utilizaron elementos de Matlab como push button, static text los cuales pueden ser modificados en el inspector de propiedades.

Push Button se cambió de nombre al de simulación el cual al ejecutarlo nos conduce a otra ventana para la ejecución del programa principal.

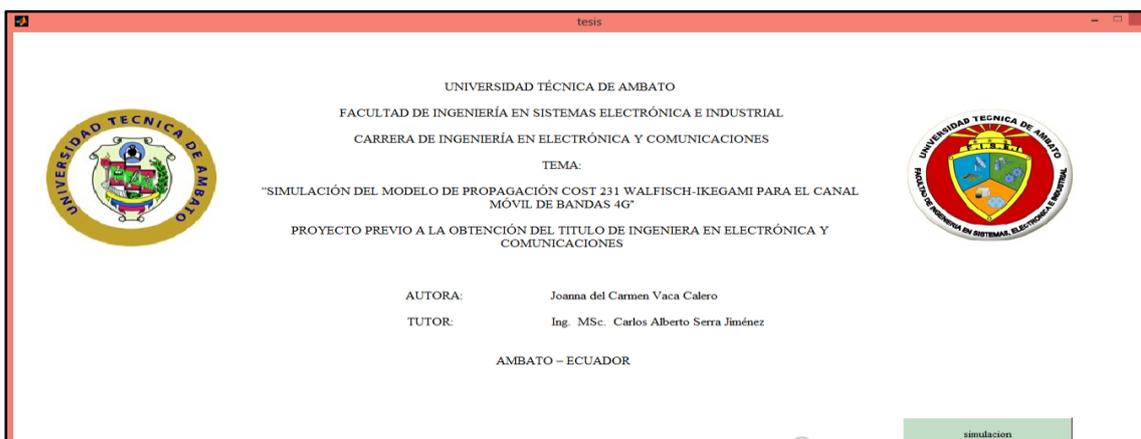


Fig.4. 9: Presentación del proyecto.

Fuente: Investigadora

La figura 4.10 presenta el desarrollo de la simulación el ingreso de los datos se realiza a través de un edit text, para los nombres de los parámetros se utiliza un static text, también se utilizan 4 botones, el botón cálculo muestra el resultado de las pérdidas es decir realiza todas operaciones de las ecuaciones que presenta el modelo de propagación, el botón perdidas vs distancia así como el de pérdidas vs frecuencia son para graficar, el botón borrar par que los parámetros se reinicien a cero al igual que las gráficas y el botón salir abandona completamente de la simulación principal ubicándonos en la ventana de la caratula.

Los parámetros que se ingresan y los resultados son agrupados en un panel group.

Para la gráfica de las pérdidas se utiliza un axes.

Se muestra valores que son utilizados en el modelo de propagación, dentro de ellos la altura de la estación móvil y radios son valores tomados de la recomendación Rec. UIT-R P.1411 por parte de la UIT.

Para los datos de edificios se utiliza los siguientes valores: altura de los edificios es igual $3 \times \text{Número de pisos} + \text{ático}$, ático 3 ó 0 m, separación entre edificios varíe entre 20-50m, ancho de la calle es igual a la separación entre edificios dividido para 2, la distancia viene dada en km cuyo valor se da entre 0.02-5 km.

La altura de la estación base se encuentra entre los 4 y 50 m la altura del receptor o altura de la estación móvil se encuentra entre 1 a 3m.

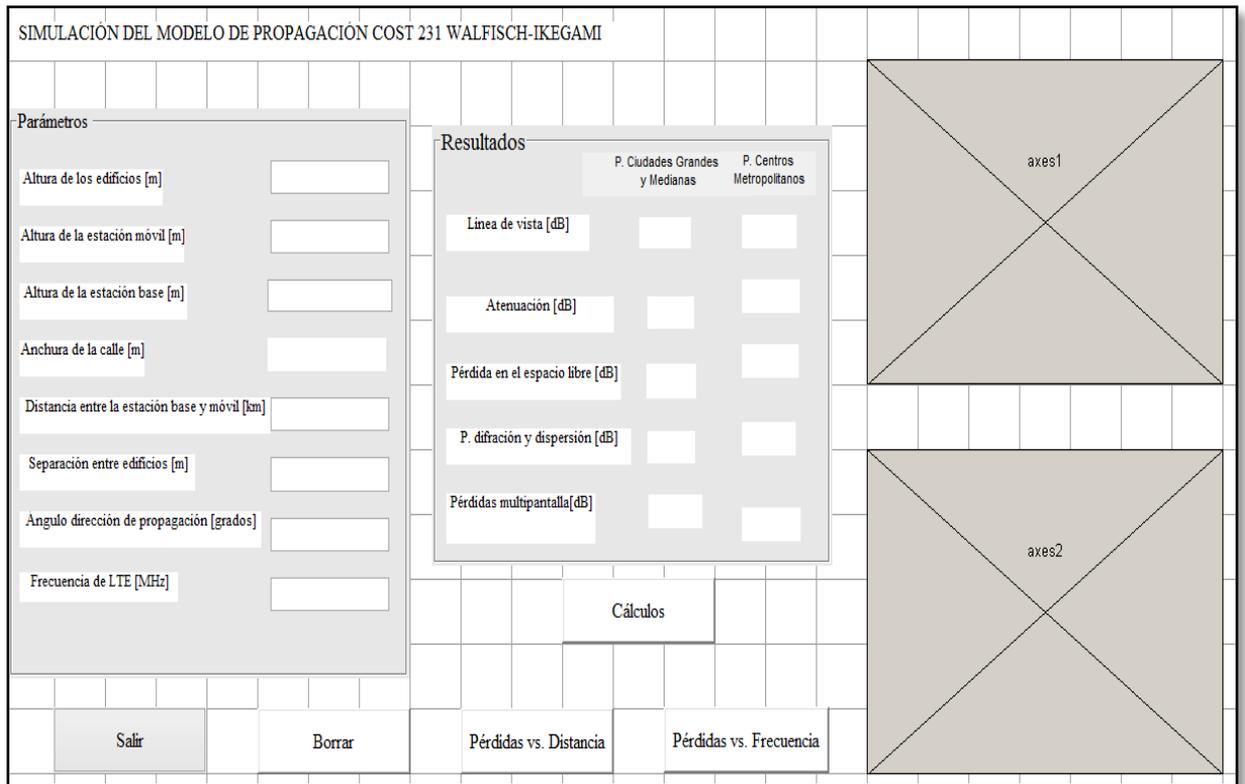


Fig.4. 10: Interfaz de la simulación.

Fuente: Investigadora

Parámetros

Altura de los edificios [m]	<input type="text"/>
Altura de la estación móvil [m]	<input type="text"/>
Altura de la estación base [m]	<input type="text"/>
Anchura de la calle [m]	<input type="text"/>
Distancia entre la estación base y móvil [km]	<input type="text"/>
Separación entre edificios [m]	<input type="text"/>
Angulo dirección de propagación [grados]	<input type="text"/>
Frecuencia de LTE [MHz]	<input type="text"/>

Fig.4. 11: Ingreso de los parámetros de entrada

Fuente: Investigadora

Resultados		
	P. Ciudades Grandes y Medianas	P. Centros Metropolitanos
Línea de vista [dB]		
Atenuación [dB]		
Pérdida en el espacio libre [dB]		
P. difracción y dispersión [dB]		
Pérdidas multipantalla [dB]		

Fig.4. 12: Resultados de la simulación
Fuente: Investigadora

4.5.5 Simulación del modelo de propagación COST 231 WI

Cada modelo de propagación se basa en una fórmula diferente, debido a que poseen variaciones en sus parámetros. Por ejemplo, para el modelo de Tierra Plana es suficiente saber alturas de Tx y Rx, obstáculos y las distancias entre Tx y Rx como de todos los obstáculos referidos a la antena transmisora; para Okumura se necesita las alturas de Tx y Rx y para COST 231 se debe especificar altura de edificios, distancia entre estos, ancho de las calles, y el ángulo de llegada a la calle

Se procede a verificar la exactitud de los resultados del modelo de propagación con cálculos realizados a mano y los proporcionados por la simulación, los datos ingresados son los siguientes: frecuencia de 700MHz, distancia 20m, altura de los edificios de 20m, altura del móvil de 1.5m, altura de la base 30m, ángulo de 37°, separación entre edificios 50m para un sistema de comunicaciones móviles celulares en un medio suburbano con densidad de vegetación moderada:

$$L_b = L_0 + L_{rts} + L_{msd}$$

$$L_0 = 32.5 + 20\log d + 20\log f$$

$$L_0 = 32.5 + 20\log 20 + 20\log 700$$

pérdida en el espacio libre $L_0 = 115.42dB$

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.3571\phi & 0 \leq \phi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\phi - 35) & 35 \leq \phi < 55^\circ \\ 4 - 0,114(\phi - 55) & 55 \leq \phi < 90^\circ \end{cases}$$

$$L_{ori} = 2.5 + 0.075 \log(37 - 35)$$

$$L_{ori} = 2,65$$

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \log W + 10 \log f + 20 \log \Delta h_R + L_{ori} \quad \Delta h_R = h_R - h_m$$

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \log 25 + 10 \log 700 + 20 \log(20 - 1.5) + 2,65$$

pérdidas difracción y dispersión del tejado $L_{rts} = 25.56dB$

$$L_{bsh} = -18 \log(1 + \Delta h_B) \quad \text{donde } \Delta h_B = h_B - h_R$$

$$L_{bsh} = -18 \log(1 + 10)$$

$$L_{bsh} = -18.74dB$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \Delta h_B \geq 0 \\ 54 - 0,8 \Delta h_B & \Delta h_B < 0 \text{ y } d \geq 0,5 \\ 54 - 1,6 \Delta h_B d & \Delta h_B < 0 \text{ y } d < 0,5 \\ 18 & \Delta h_B \geq 0 \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_B}{h_R} & \Delta h_B < 0 \end{cases}$$

$$k_a = 54$$

$$k_d = 18$$

$$k_f = -4 + 0,7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right)$$

$$k_f = -4.17 \text{ para ciudades grandes y medianas}$$

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d + k_f \log f - 9 \log b$$

pérdidas multipantalla $L_{msd} = 31.51dB$

$$L_{os} = 42,6 + 26 \log d + 20 \log f$$

pérdidas con línea de vista $L_{os} = 133.32 dB$

pérdidas sin línea de vista $L_b = 172.49dB$

$$k_f = -4 + 1.5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right)$$

$k_f = -4.36$ para centros metropolitanos

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d + k_f \log f - 9 \log b$$

pérdidas multipantalla $L_{msd} = 30.98dB$

$$L_{os} = 42,6 + 26 \log d + 20 \log f$$

pérdidas con línea de vista $L_{os} = 133.32dB$

pérdidas sin línea de vista $L_b = 171.92dB$

Cálculos de la simulación

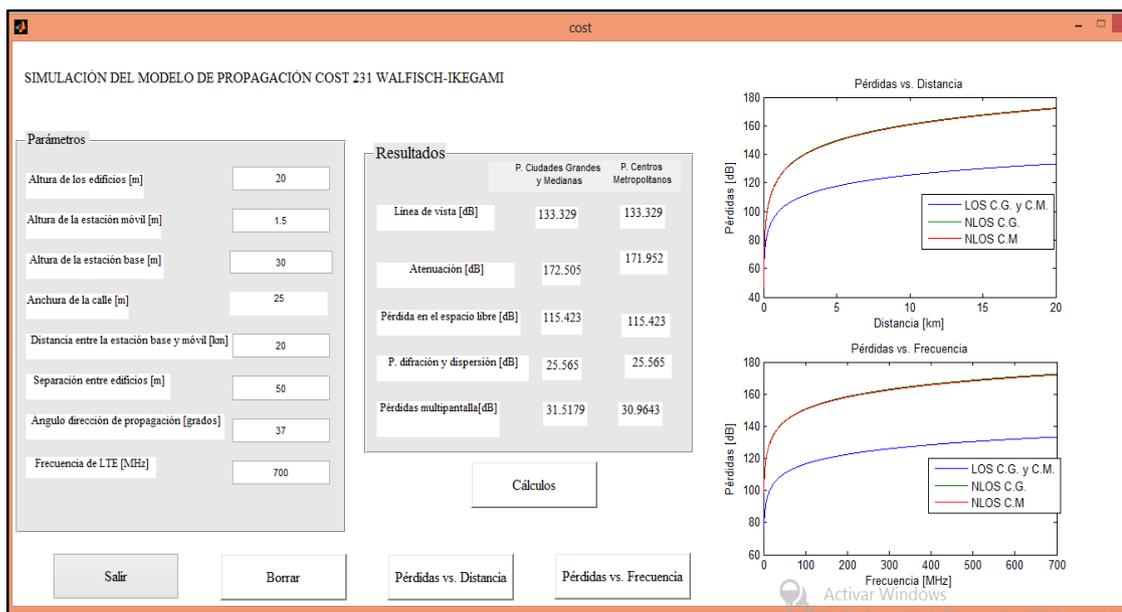


Fig.4. 13: Simulación del modelo COST 231 WI.

Fuente: Investigadora

Parámetros	
Altura de los edificios [m]	20
Altura de la estación móvil [m]	1.5
Altura de la estación base [m]	30
Anchura de la calle [m]	25
Distancia entre la estación base y móvil [km]	20
Separación entre edificios [m]	50
Ángulo dirección de propagación [grados]	37
Frecuencia de LTE [MHz]	700

Fig.4. 14: Datos de entrada
Fuente: Investigadora

Resultados	P. Ciudades Grandes y Medianas	P. Centros Metropolitanos
	Línea de vista [dB]	133.329
Atenuación [dB]	172.505	171.952
Pérdida en el espacio libre [dB]	115.423	115.423
P. difracción y dispersión [dB]	25.565	25.565
Pérdidas multipantalla [dB]	31.5179	30.9643

Fig.4. 15: Resultados de las pérdidas de la señal
Fuente: Investigadora

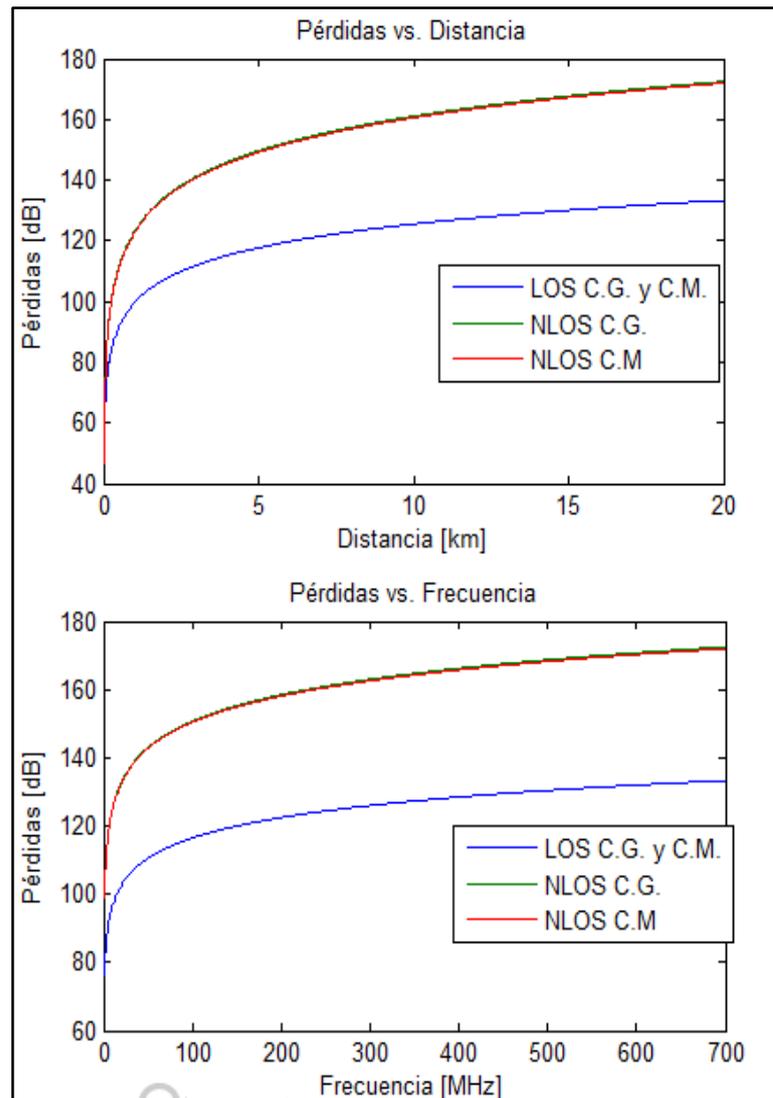


Fig.4. 16: Gráficas de las pérdidas en función del tiempo y la frecuencia
Fuente: Investigadora

Se puede observar claramente que los resultados realizados a mano coinciden claramente con los con los resultados de la simulación claro que por el programa los decimales varían un poco pero los resultados son los esperados.

La reforma impuesta por el Municipio de Ambato nos dice la altura máxima 60m para parroquias urbanas y para parroquias rurales de hasta 100m.

En edificios y terrazas que no superen los 25m.

La estructura de soporte de las estaciones radioeléctricas de servicios móviles avanzados podrá tener una altura máxima de 60m desde la calzada en las áreas urbanas.

En la tabla 4.2 se muestra otros ejemplos que se realizaron con la simulación, los valores que se tomaron en cuenta son aproximaciones a un entorno real para darnos una idea más clara de las pérdidas que obtienen al utilizar este modelo de propagación.

Tabla 4. 2 Ejemplos de las pérdidas obtenidas

FRECUENCIAS DE LTE [MHZ]	PARÁMETROS DE INGRESO						RESULTADOS PÉRDIDAS			
	Altura de los edificios [m]	Altura de la estación base	Altura de la estación móvil	Separación entre edificios [20-50]m	Distancia >= 20m	Ángulo [grados]	Línea de vista Ciudades Grandes [dB]	Línea de vista C. Metropolitanos [dB]	Sin línea de vista Ciudades Grandes [dB]	Sin línea de vista C. Metropolitanos [dB]
700	30	4	1	20	20	0	133.329	133.329	227.779	227.26
850	15	50	2	30	30	35	139.594	139.594	173.44	173.25
1700	12	35	1.5	40	2000	37	193.036	193.036	251.727	253.892
1900	18	40	2.5	50	4000	55	201.829	201.829	268.17	270.935
2100	27	28	3	25	5000	90	205.218	205.218	-----	-----

Fuente: Investigadora

Las pérdidas que se muestran en la tabla 4.2 indican que tanto para las ciudades grandes y medianas así como para centros metropolitanos cuando se tiene línea de vista los resultados son iguales en cambio cuando no hay línea de vista las pérdidas varían.

A mayor distancia y a mayor frecuencia en centros metropolitanos existe una diferencia notable en los resultados de las pérdidas.

4.5 Análisis y Discusión de resultados

La interfaz COST 231, está diseñada para simular las pérdidas existentes, se ha programado para entregar resultados de pérdidas en escenarios de ciudades grandes y medianas, así como centros metropolitanos, todos estos resultados vienen en dB.

Los resultados mostrados por la tabla 4.2 son importantes puesto que se realizó con diferentes alternativas, donde se puede verificar que en el modelo COST 231 WI el parámetro más preponderante en el modelo de propagación es la frecuencia, además se muestra que las pérdidas varían en un rango determinado lo que limita de cierta forma la aplicación de este modelo, al entregar el valor de las pérdidas en diferentes ambientes, ayuda a tener una concepción más clara al momento de definir distancias y coberturas para las radio bases en LTE y cualquier sistema celular.

Este modelo, a diferencia de Walfisch-Bertoni, puede ser aplicado cuando la antena de la estación base se encuentra por debajo de la altura media de las edificaciones.

En el modelo de Okumura no es posible determinar las pérdidas directamente a partir de una expresión matemática. Este es uno de los inconvenientes del modelo, puesto que su evaluación a una distancia y frecuencia dadas requiere la ubicación de los puntos manualmente en un gráfico.

Para que el proyecto consiga su propósito se ingresó al simulador dos clases de datos los que son para el enlace y los parámetros de LTE como la frecuencia de trabajo.

Los resultados las pérdidas muestra valores adecuados, donde se indica que en las ciudades grandes con más obstáculos van a tener el mismo resultado que las ciudades más pequeñas, las ciudades suburbanas tienen pérdidas más bajas, por la menor cantidad de obstáculos.

Se consideró conveniente hacer uso del modelo COST 231 una modificación de los modelos Walfisch- Bertoni e Ikegami, ya este modelo considera la orientación de las calles permitiendo obtener mejores aproximaciones en entornos urbanos.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- En el proyecto presentado se ha demostrado que la simulación del canal móvil para bandas de 4G se obtuvo resultados aceptables en la predicción de pérdidas de trayecto en entornos urbanos basado en el modelo de propagación COST 231 Walfisch-Ikegami, también se pudo notar que existe mayores pérdidas de la señal cuando la frecuencia utilizada es alta por lo que se requiere que los equipos de transmisión tengan una potencia mayor para tener una mejor señal.
- En el modelo programado, existe la posibilidad de modificar parámetros, ecuaciones con el fin de que el software pueda ser fácilmente actualizable con las nuevas recomendaciones de la UIT este modelo fue desarrollado para cubrir las necesidades que se presentan en diferentes entornos.
- Con la realización de la simulación se pudo observar que el modelo de propagación COST 231 WI permite obtener resultados más cercanos a mediciones experimentales debido a que este modelo es una modificación de los modelos Walfisch-Bertoni e Ikegami, además este modelo considera la orientación de las calles permitiendo obtener mejores aproximaciones.

5.2 Recomendaciones

- LTE cuenta con varios métodos de seguridad y su continua evolución nos conduce a seguir pendiente de sus avances, con estos se puede realizar futuras investigaciones y a la obtención de datos más seguros.

- Se recomienda realizar la simulación utilizando otros modelos de propagación para observar cómo se propaga la señal porque es muy importante observar cuál de los diferentes modelos de propagación existentes se adapta mejor al entorno en el que se está trabajando.
- En la programación hay que tener en cuenta que para mostrar una imagen es necesario que las imágenes se encuentren grabadas en el mismo lugar que se encuentra nuestro programa caso contrario esto nos generaría un error.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] O. Carrasco, J. Marcos, “Tendencias Las Small Cells”, Claves en el despliegue de LTE, Marzo 2014
- [2] M. E. Arcia “4G: velocidad pero limitada a dispositivos compatibles” [Online]. Disponible en: <http://tabletas.about.com/od/Glosario/fl/4G-que-es-ventajas-y-desventajas-de-esta-red-movil.htm>.
- [3] C. E. Rodríguez, M. Arias, “Simulación y Análisis de una Red LTE en Ambientes Urbanos de la ciudad de Managua”. Universidad Nacional de Ingeniería; Managua Nicaragua, 2012.
- [4] AGN “La proximidad del servicio 4G despierta expectativas” El mercurio 2014/06/17 [Online]. Disponible en: <http://www.elmercurio.com.ec/435833-red-4g-incrementa-velocidad-de-internet-en-celulares/#.VG0TyiOUdic>.
- [5] J. D. Analuisa “Diseño de una red 4G Long Term Evolution (LTE) en redes móviles”, Trabajo Fin de Carrera, Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, Universidad Técnica de Ambato Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial, Ambato, 2014 pp 2.
- [6] H. G. de la Torre, G. H. Berzal “Estudio y desarrollo sobre sistemas de simulación para comunicaciones móviles, LTE”, Trabajo Fin de Carrera, Escuela de Ingeniería Técnica de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2013.
- [7] L. A. Fernández “Estudio y simulación del canal móvil para bandas de LTE con distribuciones Rician y Rayleigh en el modelo de propagación Okumura-Hata en base a Matlab”, Trabajo Fin de Carrera, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2014.
- [8] R. Alonso, R. Bordón y S. Montejo “Estudio comparativo de los modelos de propagación de canal inalámbrico” Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones Vol.XXXIV 1/2013 p.12-26 Enero - Abril ISSN: 1815-5928.

- [9] Autores Varios, Editorial Marcombo, S.A, Serie Mundo Electrónico “Telecomunicaciones Móviles” Segunda Edición pp 1 [Online]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=ztTpTayFeSUC&pg=PT131&dq=generacion+de+419&sa=X&ei=jLVOC5E4HdgwTY84PwDQ&ved=0CCQQ6AEwAQ#v=onepage&q>
- [10] D. Muñoz Rodríguez “Sistemas inalámbricos comunicación personal” pp 1 [Online]. Disponible: https://books.google.com.ec/books?id=Gvh1UA0yHJ4C&printsec=frontcover&dq=David+419&sa=X&ei=YVXiVOD_BMqmgwTzmILoBQ&ved=0CB0Q6AEwAA#v=onepage&q
- [11] Principios de comunicaciones móviles Oriol Sallent Roig, Ramon Agustí Comes, José Luis Valenzuela González pp 19- 20 [Online]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=GAf5BKJOfUwC&pg=PA29&dq=generacion+d+e+419&sa=X&ei=jLVOC5E4HdgwTY84PwDQ&ved=0CB0Q6AEwAA#v=onepage&q=generacion>
- [12] 3GPP LTE: hacia la 4G móvil Jorge Cabrejas Peñuelas, Juan José Olmos Bonafé, Mario García Lozano, Ana Fernández Aguilera pp 1-4 [Online]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=XuQVmNNzXckC&pg=PT50&dq=generacion+de+419&sa=X&ei=pMGmVOPHDcenNpqqsgH&ved=0CC8Q6AEwA#v=onepage&q=generacion>
- [13] O. Rodríguez, R. Hernández, L.Torno, L. García, R. Rodríguez, Ciencias Holguín, Revista trimestra,”Telefonía móvil celular: origen, evolución, perspectivas” Enero-Marzo, 2005, Cuba.
- [14] J. M. Huidrobo Moya Ciencia Divulgativa “Radiocomunicaciones: Viajando a través de las ondas” pp 113-115.
- [15] J. M. Hernando “Comunicaciones Móviles” Editorial Madrid: Centro de Estudios Ramón Areces, 1997, pp 2-3.
- [16] M. Inzaurrealde, J. Isi, J. Garderes “Telefonía Celular”, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República Montevideo, Uruguay [Online]. Disponible en: <http://cyberkamate.host56.com/celul.pdf>.

- [17] SUPERTEL “Evolución de la Telefonía Móvil en Ecuador” Revista Institucional, Número 16, 2012, pp 5-6.
- [18] L. R. Guanga Bañdeón, “Análisis de la influencia de los factores externos en la QoS del servicio móvil avanzado en algunas zonas de la provincia de Pichincha y propuestas para el mejoramiento de las QoS”, Proyecto Previo a la obtención del Título de Ingeniero en Electrónica y Redes de Información, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Enero, 2014.
- [19] SUPERTEL “Evolución de la Telefonía Móvil en Ecuador” Revista Institucional, Número 16, 2012, pp 6.
- [20] J. M. Huidrobo Moya, Ciencia Divulgativa Radiocomunicaciones: Viajando a través de las ondas pp 125.
- [21] J. M. Huidrobo Moya, Comunicaciones Móviles: Sistemas GSM, UMTS y LTE, Ediciones de la U, Mayo 2011, pp 253-259-264-284-289-306.
- [22] J. K. Sánchez Ortega, “LONG TERM EVOLUTION (LTE: evolución a largo plazo), los aspectos técnicos en la evolución hacia redes móviles FULL IP”, Previo a la obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones con mención en Gestión Empresarial en Telecomunicaciones, Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, 2014.
- [23] R. Valdivieso “Sacar el máximo partido de la tecnología MIMO” [Online]. Disponible en: <http://www2.alcatel-lucent.com/techzine/es/sacar-maximo-partido-tecnologia-mimo/> September 19, 2013
- [24] GARCIA J. C., RODRIGUEZ O. A., CASTILLO J. L. Desempeño de Modelos de Propagación en Comunicación Móvil para la zona de Caldas Parte 1: Modelos para áreas urbanas. X Congreso Internacional de Telecomunicaciones. Valdivia, Chile. 2002.
- [25] J. M. Hernando “Comunicaciones Móviles” Editorial Madrid: Centro de Estudios Ramón Areces, 1997, pp 48-59 y 148-159.
- [26] R. Agustí, F. Bernardo, F. Casadevall, R. Ferrús, J. Pérez, O. Sallent “LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles” Editorial: Fundación Vodafone España, 2010, pp 121-123.

- [27] C. Crespo Cadenas “Radiocomunicación” Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad de Sevilla, septiembre de 2007, pp 8-9.
- [28] R. Agusti, F. Bernardo, F. Casadevall, R. Ferrús, J. Pérez, O. Sallent “LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles” Editorial: Fundación Vodafone España, 2010, pp 364-366.
- [29] J. M. Huidrobo Moya, Comunicaciones Móviles: Sistemas GSM, UMTS y LTE, Ediciones de la U, Mayo 2011, pp 261-263.
- [30] J. M. Hernando “Comunicaciones Móviles” Editorial Madrid: Centro de Estudios Ramón Areces, 1997, pp 148-159.
- [31] J. D. Analuisa “Diseño de una red 4G Long Term Evolution (LTE) en redes móviles”, Trabajo Fin de Carrera, Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, Universidad Técnica de Ambato Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial, Ambato, 2014 pp 121.