

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

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

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

FERNÁNDEZ ORQUERA LUIS ALEJANDRO

(alejo_s.m@hotmail.com)

DIRECTOR: ING. CARLOS ALFONSO HERRERA MUÑOZ

(carlos.herrera@epn.edu.ec)

Quito, MARZO 2014

DECLARACIÓN

Yo, Luis Alejandro Fernández Orquera, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Luis Alejandro Fernández Orquera

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Luis Alejandro Fernández Orquera, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Herrera
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A mi familia en general, por ayudarme durante todo este ciclo universitario.

A mis padres Elina Orquera y Antonio Fernández por encaminarme, inculcarme valores suficientes para poder elegir entre el bien y el mal.

A Dios por darnos salud y en los momentos difíciles darnos paz, tranquilidad para poder conllevar la vida de mejor manera.

A mi hermana, amigos y enamorada por estar en los momentos de iras, de juegos, de bromas que han hecho que me sienta realizado como persona.

A la Escuela Politécnica Nacional por todos los momentos de aprendizaje, que hacen de cada uno que estuvo en esta universidad buenos profesionales y en especial a mi director del proyecto de titulación Ing. Carlos Herrera por la comprensión mostrada para cumplir este último paso en esta sabia morada.

Alejandro Fernández Orquera

DEDICATORIA

Dedicó este trabajo a todos los que me acompañaron durante este periodo de mi vida, que comprendieron las complicaciones de trabajar y acabar este proyecto, ayudándome a cumplir con mis objetivos de superación personal y profesional.

Alejandro Fernández Orquera

PRESENTACIÓN

LTE es una tecnología que se presenta por la continua evolución de la telefonía celular, es el paso de la tecnología 3.5G a cuarta generación celular, en la cual se ofrecen mayores beneficios y performance que todas las generaciones anteriores, dando un aspecto de ubicuidad y convergencia para las comunicaciones actuales y futuras.

Los avances producidos por la evolución de las antenas con diversas técnicas han permitido la mejor modelación del canal inalámbrico, dando un uso del espectro radioeléctrico más eficiente que ha dado lugar al desarrollo de la tecnología celular a gran escala y apuntando siempre a la convergencia de redes.

En este trabajo se indica los conceptos, descripción y funcionamiento de las redes con *Long Term Evolution* (LTE) y su posterior evolución a LTE-A, además la realización de un programa de simulación en MATLAB, en el cual se representa al canal inalámbrico en un modelo de propagación para las bandas de frecuencias utilizadas por LTE y su evolución en *LTE Advanced* (LTE-A).

Dando un punto de vista sobre la tecnología que se está implementando en el país que es LTE, permitiendo conocer sus generalidades e infraestructura, para observar sus beneficios prácticos, tomando en cuenta el medio ambiente y los escenarios donde se propagan las señales.

RESUMEN

La tecnología *Long Term Evolution*, más conocida como LTE, es una de las evoluciones en redes inalámbricas más interesantes de los últimos tiempos pues, aparte de ofrecer mejoras significativas sobre las tecnologías antecesoras, muestra la posibilidad de interconexión con diversas redes que no sean exclusivamente redes celulares, dando la apertura a una convergencia completa de redes de datos, voz y video además su interconexión con todo dispositivo que utilice el protocolo IP.

La evolución de LTE es sin duda uno de los pasos más significativos de la tecnología celular hacia el futuro, pues alcanza velocidades iguales o superiores que las obtenidas mediante medios de transmisión cableados, con baja latencia y entrega de datos eficiente, LTE está diseñado con técnicas avanzadas de acceso derivadas de OFDMA en el canal de radio y un ancho de banda flexible, permitiendo a los operadores de telefonía celular puedan migrar sus redes de HSPA a LTE, para lo cual se dispone de una nueva arquitectura de red propia de esta tecnología pero a su vez muy compatible para su actualización, por eso permite soportar tráfico de conmutación de paquetes, con manejo de calidad de servicio a una mínima latencia.

En el capítulo I se realiza una introducción de los aspectos fundamentales de la tecnología LTE, la arquitectura utilizada en esta tecnología, la compatibilidad con las tecnologías antecesoras y las principales funciones del protocolo *Long Term Evolution*.

En el capítulo II se describe las generalidades del canal inalámbrico, sus efectos de desvanecimiento en especial las distribuciones de Rice y Rayleigh, se detalla el modelo de propagación Okumura-Hata para los diferentes ambientes (Urbano, Suburbano y Rural), descripción de zonas de Fresnel y margen del enlace.

En el capítulo III se realiza la simulación del canal inalámbrico con tecnología LTE en sus bandas de frecuencia, para las distribuciones de Rice y Rayleigh, con el modelo de propagación Okumura-Hata en sus tres ambientes.

En el capítulo IV se presentan los resultados obtenidos con la simulación y se compara con las especificaciones dadas para *Long Term Evolution* (LTE).

En el capítulo V se indican las conclusiones y recomendaciones que se mostraron al realizar este proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CONTENIDO	Página.
DECLARACIÓN	i
CERTIFICACIÓN	ii
AGRADECIMIENTO	iii
DEDICATORIA	iv
PRESENTACIÓN	v
RESUMEN	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE TABLAS	xvii

CAPÍTULO 1

ESTUDIO DE LA TECNOLOGÍA LTE

1.1. Introducción y antecedentes	1
1.2. Tecnologías antecesoras a LTE	1
1.2.1. Primera Generación (1G)	2
1.2.2. Segunda Generación (2G)	3
1.2.3. Tercera Generación (3G)	5
1.2.4. Evolución HSPA (3.5G)	6
1.3. Tecnología <i>Long Term Evolution</i> (LTE)	8
1.3.1. Esquema básico de transmisión	8
1.3.2. Requerimientos del sistema LTE	9
1.4. LTE Release 9	14
1.4.1. Cambios producidos en Release 9	14
1.4.2. Categorías de equipos finales soportados LTE (Release 8-9)	15
1.5. LTE- <i>Advanced</i> (Release 10)	16
1.5.1. Características de LTE-A	17
1.5.2. Categorías de equipos de usuarios LTE- <i>Advanced</i>	19
1.5.3. Comparación entre LTE y LTE- <i>Advanced</i>	20
1.6. LTE- <i>Advanced</i> (Release 11)	21
1.7. LTE - (Release 12)	22

1.7.1.	Posibles mejoras LTE - B.....	23
1.7.2.	Cuadro de posibles beneficios del Release 12.....	24
1.8.	Arquitectura de red LTE	24
1.8.1.	Visión general de la arquitectura LTE.....	24
1.9.	Núcleo de red LTE.....	27
1.10.	Entidad de gestión de movilidad (MME: <i>Mobility Management Entity</i>)	28
1.10.1.	Autenticación y autorización de acceso	29
1.10.2.	Gestión de movilidad de los usuarios en modo idle	29
1.10.3.	Roaming.....	29
1.10.4.	Protocolos de señalización NAS (<i>Non Access Stratum</i>)	29
1.11.	Compuerta de enlace de servicio (S-GW: <i>Serving Gateway</i>).....	30
1.12.	Compuerta de enlace hacia la red de datos (P-GW: <i>PDN Gateway</i>)	30
1.13.	Elementos comunes a las redes 3GPP	31
1.13.1.	Servidor de suscripción de abonados (HSS: <i>Home Subscriber Server</i>)	31
1.13.2.	(PCRF: <i>Policy and Charging Rules Function</i>)	32
1.13.3.	(OCS: <i>Online Charging System</i>)	32
1.13.4.	(OFCS: <i>Offline Charging System</i>)	33
1.14.	Interfaces pertenecientes al núcleo del sistema LTE	33
1.14.1.	Interfaz (SGi)	33
1.14.2.	Interfaces (S5 y S8).....	34
1.14.3.	Interfaz (S11)	34
1.14.4.	Interfaz (S10)	34
1.14.5.	Interfaz (S6a)	35
1.14.6.	Resumen de los elementos que constituyen el núcleo del sistema LTE ..	35
1.15.	Red acceso LTE	36
1.15.1.	<i>Evolved NodeB</i> (eNB).....	37
1.16.	Interfaces pertenecientes a la red de acceso del sistema LTE.....	38
1.16.1.	Interfaz de radio (Uu)	38
1.16.2.	Interfaz (S1)	39
1.16.3.	Interfaz (X2).....	40
1.16.4.	Resumen de los elementos que constituyen la red de acceso de LTE	40
1.17.	<i>Mobile Station</i> (MS).....	41
1.18.	Protocolos de red LTE	42
1.18.1.	Protocolos en la interfaz radio.....	42

1.18.2.	Protocolos pertenecientes al plano de usuario	43
1.19.	Canales asociados a la subcapa RLC.....	46
1.20.	Control de Acceso al Medio o <i>Medium Access Control</i> (MAC).....	47
1.20.1.	Programación dinámica o <i>scheduling dinamic</i>	47
1.20.2.	Multiplexación de paquetes	47
1.20.3.	Control de errores	48
1.21.	Canales asociados a la subcapa MAC	48
1.22.	Protocolos pertenecientes al plano de control.....	49
1.22.1.	Control de Recursos de Radio (RRC).....	49
1.23.	Protocolos NAS (<i>Non-Access Stratum</i>)	50
1.24.	IP <i>Multimedia Subsystem</i> (IMS)	51

CAPÍTULO 2

CANAL INALÁMBRICO Y MODELO DE PROPAGACIÓN EN LTE

2.1.	Introducción	53
2.2.	Canal inalámbrico.....	53
2.3.	Características del canal inalámbrico.....	54
2.3.1.	Interferencia.....	54
2.3.2.	Atenuación.....	55
2.3.3.	Atenuación en espacio libre	55
2.3.4.	Atenuación en general.....	57
2.4.	Fading o desvanecimiento	58
2.4.1.	Desvanecimiento a gran escala	59
2.4.2.	Desvanecimiento a pequeña escala.....	59
2.4.3.	Desvanecimiento multitrayectoria	59
2.4.4.	Dispersión de tiempo (<i>delay spread</i>).....	60
2.4.5.	Desvanecimiento plano (<i>flat fading</i>).....	60
2.4.6.	Desvanecimiento selectivo (<i>selective fading</i>).....	61
2.4.7.	Efecto Doppler (<i>Doppler spread</i>)	61
2.4.8.	Desvanecimiento rápido (<i>fast fading</i>).....	62
2.4.9.	Desvanecimiento lento (<i>slow fading</i>)	62
2.5.	Modelamiento del canal inalámbrico	63

2.5.1.	Modelo de desvanecimiento de Rayleigh	63
2.5.2.	Modelo de desvanecimiento de Rician	64
2.5.3.	Modelo de shadowing	65
2.6.	Indicadores de desvanecimiento	66
2.6.1.	Cambio de cruce de nivel o <i>Level Crossing Rate</i> (LCR)	66
2.6.2.	Duración promedio del desvanecimiento	67
2.6.3.	Zonas de Fresnel	67
2.7.	Modelos de propagación	69
2.7.1.	Modelo de propagación Okumura- Hata	70
2.8.	Factores a tomar en cuenta en el enlace inalámbrico	74
2.8.1.	Margen de desvanecimiento (<i>fading margin</i>)	74
2.8.2.	Margen del enlace (<i>link margin</i>)	75
2.9.	Compensación de los efectos del canal	76
2.9.1.	Ecuación	77
2.9.2.	Diversidad	77
2.10.	Técnicas avanzadas de acceso para LTE	79
2.10.1.	Multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM)	79
2.10.2.	OFDMA como técnica de acceso para el enlace descendente de LTE ...	81
2.10.3.	SC-FDMA como técnica de acceso para el enlace ascendente de LTE ..	83
2.11.	Técnicas de duplexación para LTE	85
2.11.1.	Duplexación por división de tiempo (TDD)	85
2.11.2.	Duplexación por división de frecuencia (FDD)	86
2.12.	Técnicas de múltiples antenas	86
2.12.1.	Configuración SIMO (<i>Single-Input Multiple-Output</i>)	87
2.12.2.	Configuración MISO (<i>Multiple-Input Single-Output</i>)	88
2.12.3.	Configuración MIMO (<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>)	88
2.12.4.	MIMO multiusuario (MU MIMO)	90
2.13.	Esquemas de modulación y demodulación usados en LTE	91
2.13.1	Modulación de fase de cuadratura (QPSK)	91
2.13.2.	Modulación QAM	92
2.13.3.	Modulación en amplitud de cuadratura de 16 símbolos (16-QAM)	93
2.13.4.	Modulación en amplitud de cuadratura de 64 símbolos (64-QAM)	94
2.14.	Capa física	95
2.14.1.	Estructura de la trama LTE	97

2.15.	Canales físicos.....	98
2.15.1.	Canales físicos para enlace downlink	99
2.15.2.	Canales Físicos para enlace uplink	100

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN DEL CANAL INALÁMBRICO Y MODELO DE PROPAGACIÓN

3.1.	Introducción	101
3.2.	Generalidades MATLAB	101
3.3.	GUIDE (interfaz gráfica de MATLAB).....	103
3.4.	GUI: Representación gráfica de funciones	105
3.5.	Diagrama de flujo de GUIDE	108
3.6.	Principales funciones de MATLAB para GUIDE	109
3.6.1.	Manejo de datos (<i>Handles</i>).....	109
3.6.2.	Obtener y asignar (<i>get and set</i>)	109
3.6.3.	Mensajes por pantalla	110
3.7.	Estructura del programa.....	110
3.7.1.	SIMULADOR LTE	111
3.7.2.	Menú Principal	113
3.7.3.	Okumura-Hata	116
3.7.4.	NLOS (Distribución Rayleigh)	123
3.7.5.	LOS (Distribución Rician / Rice)	134
3.8.	Sub-Interfaces secundarias	143
3.8.1.	“Lista de Ayuda”	144
3.8.2.	“Acerca de”	146

CAPÍTULO 4

COMPARACIÓN DEL CANAL INALÁMBRICO Y MODELO DE PROPAGACIÓN DE LTE

4.1.	Introducción	148
4.2.	Utilización del simulador.....	148
4.3.	Comparación de resultados.....	151

4.3.1.	Interfaz Okumura-Hata.....	151
4.3.2.	Interfaz NLOS (<i>Non Line Of Sight</i>)	154
4.3.3.	Interfaz LOS (<i>Line Of Sight</i>)	160

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.	Conclusiones.....	163
5.2.	Recomendaciones.....	165

Bibliografía.....	167
-------------------	-----

Glosario de Términos	171
----------------------------	-----

Anexo I:	W-CDMA (<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>) con duplexación FDD y con duplexación TDD
Anexo II:	Tabla servicios de LTE
Anexo III:	Procedimientos de gestión de seguridad
Anexo IV:	Dispositivos de usuario para LTE
Anexo V:	Antenas de Estación Base para LTE
Anexo VI:	Programa completo LTE

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1: ESTUDIO DE LA TECNOLOGÍA LTE

Figura 1.1: Evolución de los sistemas celulares	2
Figura 1.2: Evolución de HSPA	7
Figura 1.3: MIMO en LTE-Advanced.....	18
Figura 1.4: Ilustración de Inter-Site e Intra-Site CoMP	22
Figura 1.5: Niveles de integración LTE-WiFi.....	23
Figura 1.6: Esquema general de la arquitectura LTE	25
Figura 1.7: Arquitectura simplificada LTE	25
Figura 1.8: Arquitectura de red LTE	26
Figura 1.9: Arquitectura básica del núcleo de red (EPC).....	27
Figura 1.10: Separación funcional entre el eNB y MME.....	28
Figura 1.11: Separación funcional entre el eNB y SGW.....	30
Figura 1.12: Separación funcional entre el eNB y PGW.....	31
Figura 1.13: Tipos de interconexión a través de SGi	33
Figura 1.14: Red de acceso E-UTRAN	36
Figura 1.15: Separación funcional entre el eNB, MME, SGW y PGW	37
Figura 1.16: Mecanismos de transferencia de información en la interfaz radio.....	38
Figura 1.17: Equipo de usuario.....	41
Figura 1.18: Protocolos de la interfaz radio de E-UTRAN	43
Figura 1.19: Vista de plano de usuario PDCP	43
Figura 1.20: Modelo Capa RLC	45
Figura 1.21: Arquitectura conceptual sobre UE en MAC	47
Figura 1.22: Protocolos NAS entre UE y MME.....	50
Figura 1.23: Modelo de provisión de servicios en base al subsistema IMS.....	52

CAPÍTULO 2: CANAL INALÁMBRICO Y MODELO DE PROPAGACIÓN EN LTE

Figura 2.1: Canal inalámbrico	64
Figura 2.2: Distribución de Rayleigh	64
Figura 2.3: Distribución de Rice	65
Figura 2.4: Distribución Log-normal	68
Figura 2.5: Zona de Fresnel.....	68
Figura 2.6: Clasificación de los modelos de propagación.....	69
Figura 2.7: Modelo de propagación Okumura-Hata.....	71
Figura 2.8: Modelo de Ecuador	77
Figura 2.9: Diversidad Espacial	78
Figura 2.10: Diversidad angular de antenas con poca separación.....	79

Figura 2.11: Eficiencia espectral de OFDM.....	80
Figura 2.12: Esquema de OFDM.....	80
Figura 2.13: Multiplexación de usuarios en OFDMA - LTE.....	81
Figura 2.14: Parámetros de OFDMA en LTE.....	83
Figura 2.15: Esquema de transmisión de la señal SC-FDMA.....	84
Figura 2.16: Acceso bidireccional TDD.....	86
Figura 2.17: Acceso bidireccional FDD.....	86
Figura 2.18: Sistema inalámbrico codificado MIMO.....	87
Figura 2.19: Sistema MIMO de NxM.....	88
Figura 2.20: Esquema MIMO Multiusuario.....	91
Figura 2.21: Constelación QPSK.....	92
Figura 2.22: Constelaciones QAM.....	93
Figura 2.23: Constelación de 16-QAM.....	93
Figura 2.24: Constelación de 64-QAM.....	94
Figura 2.25: Estructura de trama tipo 1.....	97
Figura 2.26: Estructura de trama tipo 2.....	98

CAPÍTULO 3: DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN DEL CANAL INALÁMBRICO Y MODELO DE PROPAGACIÓN

Figura 3.1: Imagen de MATLAB.....	102
Figura 3.2: Ventana de Comandos de MATLAB.....	103
Figura 3.3: Interfaz de MATLAB.....	104
Figura 3.4: Inicio rápido de GUIDE.....	104
Figura 3.5: Figura GUI de MATLAB.....	105
Figura 3.6: Barra de herramientas de la interfaz GUI.....	107
Figura 3.7: Diagrama de flujo aplicaciones GUI-MATLAB.....	108
Figura 3.8: Interfaz SIMULADOR_LTE.....	112
Figura 3.9: Interfaz Menu_Principal.....	114
Figura 3.10: Diagrama de flujo interfaz Okumura-Hata.....	117
Figura 3.11: Interfaz Okumura-Hata.....	119
Figura 3.12: Diagrama de flujo interfaz NLOS (<i>Non Line Of Sight</i>).....	124
Figura 3.13: Interfaz NLOS (<i>Non Line Of Sight</i>).....	127
Figura 3.14: Diagrama de flujo interfaz LOS (<i>Line Of Sight</i>).....	134
Figura 3.15: Interfaz LOS (<i>Line Of Sight</i>).....	137
Figura 3.16: Subinterfaz “Lista de Ayuda”.....	144
Figura 3.17: Subinterfaz “Acerca de”.....	146

CAPÍTULO 4: COMPARACIÓN DEL CANAL INALÁMBRICO Y MODELO DE PROPAGACIÓN DE LTE

Figura 4.1: Interfaz SIMULADOR LTE	149
Figura 4.2: Interfaz “Menú Principal”	149
Figura 4.3: Interfaz Okumura-Hata	150
Figura 4.4: Interfaz NLOS (<i>Non Line Of Sight</i>)	150
Figura 4.5: Interfaz LOS (<i>Line Of Sight</i>).....	151
Figura 4.6: Interfaz Okumura-Hata con datos	155
Figura 4.7: Interfaz NLOS (<i>Non Line Of Sight</i>) con datos en downlink.....	155
Figura 4.8: Interfaz NLOS (<i>Non Line Of Sight</i>) con datos en uplink.....	157
Figura 4.9: Interfaz NLOS con datos en uplink (<i>LTE Advanced</i>)	159
Figura 4.10: Interfaz LOS (<i>Line Of Sight</i>) con datos en downlink.....	161

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1: ESTUDIO DE LA TECNOLOGÍA LTE

Tabla 1.1: Comparación de Tecnologías (2G).....	3
Tabla 1.2: Comparación GPRS vs. EDGE	5
Tabla 1.3: Parámetros técnicos de los estándares de UMTS.....	6
Tabla 1.4: Velocidades de transmisión en enlace descendente	8
Tabla 1.5: LTE Release 8	10
Tabla 1.6: Categorías de equipos finales de LTE en Releases 8 y 9	15
Tabla 1.7: Release 10 LTE-A	17
Tabla 1.8: categorías de UE soportados en la versión 10.....	19
Tabla 1.9: Diferencias entre LTE y LTE-Advanced	20
Tabla 1.10: Beneficios de 3GPP Release 12	24
Tabla 1.11: Entidades de red e interfaces de EPC.....	35
Tabla 1.12: Entidades de red e interfaces de E-UTRAN.....	40

CAPÍTULO 2: CANAL INALÁMBRICO Y MODELO DE PROPAGACIÓN EN LTE

Tabla 2.1: Factor de Rugosidad.....	74
Tabla 2.2: Factor Climático	75
Tabla 2.3: Parámetros de la capa física en LTE uplink SC-FDMA	85
Tabla 2.4: Frecuencias de LTE.....	95
Tabla 2.5: Velocidades pico en función de la canalización.....	96

CAPÍTULO 3: DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN DEL CANAL INALÁMBRICO Y MODELO DE PROPAGACIÓN

Tabla 3.1: Funciones de la interfaz GUI de MATLAB.....	106
Tabla 3.2: Barra de tareas de la interfaz GUI de MATLAB	107
Tabla 3.3: Botones utilizados en SIMULADOR_LTE	111
Tabla 3.4: Botones utilizados en Menu_Principal.....	114
Tabla 3.5: Botones utilizados en Okumura-Hata	117
Tabla 3.6: Botones utilizados en NLOS (<i>Non Line Of Sight</i>)	125
Tabla 3.7: Botones utilizados en LOS (<i>Line Of Sight</i>).....	135
Tabla 3.8: Botones utilizados en subinterfaz “Lista de Ayuda”.....	144
Tabla 3.9: Botones utilizados en subinterfaz “Acerca de”	146

CAPÍTULO 4: COMPARACIÓN DEL CANAL INALÁMBRICO Y MODELO DE PROPAGACIÓN DE LTE

Tabla 4.1: Tabla comparativa de Okumura-Hata	153
Tabla 4.2: Tabla de análisis de NLOS con Release 8 downlink	156
Tabla 4.3: Tabla de análisis de NLOS con Release 8 uplink	158
Tabla 4.4: Tabla de análisis de NLOS con LTE- <i>Advanced</i> uplink	160
Tabla 4.5: Tabla de análisis de LOS con Release 9 downlink	162

CAPÍTULO 1

ESTUDIO DE LA TECNOLOGÍA LTE

1.1. Introducción y antecedentes

Como era común en las tecnologías inalámbricas anteriores a *Long Term Evolution*, las velocidades de transmisión eran bajas, tenían bastante interferencia y por ende menor eficiencia en comparación con los medios de transmisión cableados.

Sin embargo, la evolución de las tecnologías inalámbricas ha ido aumentando a pasos agigantados en los últimos años, por la necesidad de movilidad de los usuarios con una red de datos inalámbrica que permita tener igual o mayores velocidades de transmisión que cuando se usa medios de transmisión cableados, esto produjo el profundo estudio de los sistemas de comunicación móvil estandarizados dentro de 3GPP (*Third Generation Partnership Project*), donde se busca mejorar los servicios de sistemas celulares; dando paso al sistema llamado *Long Term Evolution* (LTE) y su posterior evolución a *LTE Advanced* (LTE-A).

Con respecto a LTE y LTE-A, se detallan redes celulares que no se limitan a dar servicios a terminales móviles, sino que también permiten conexión con redes inalámbricas fijas con una buena velocidad de transmisión, capaces de manejar los requerimientos del mundo actual como video llamadas, videostreaming, contenidos multimedia de alta definición, ubicuidad, calidad de servicio (QoS) y alta seguridad en la información. ^[1]

1.2. Tecnologías antecesoras a LTE

Para llegar al sistema de comunicación móvil *Long Term Evolution* (LTE), se pasó por una línea de evolución a través del tiempo, la cual fue simultánea con la necesidad de nuevos servicios requeridos por los usuarios.

A continuación se describe la evolución de los sistemas de comunicación móvil.

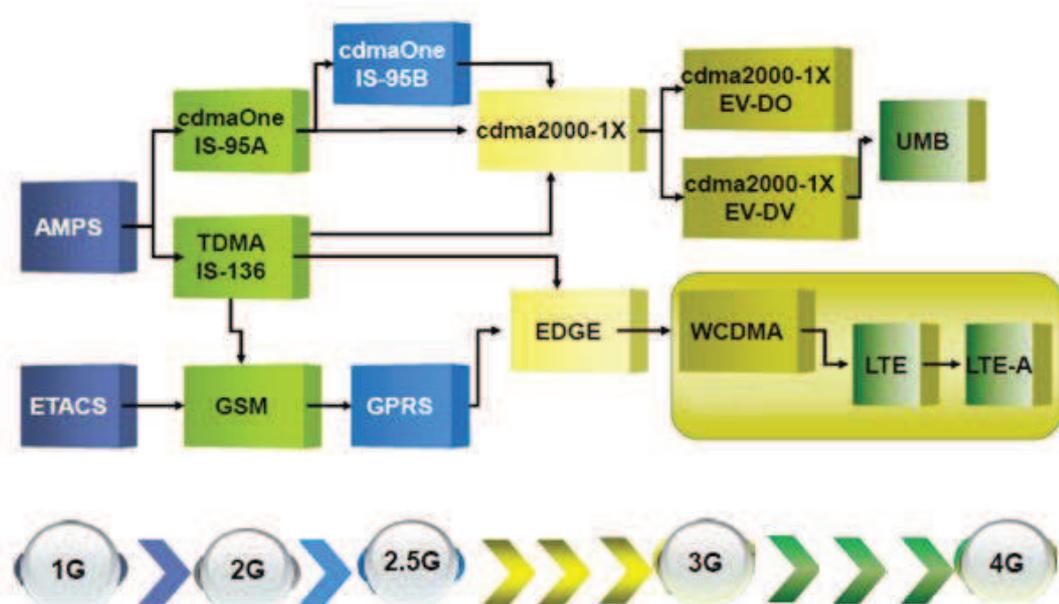


Figura 1.1: Evolución de los sistemas celulares [2]

Como se observa en la Figura 1.1 la evolución de los sistemas celulares pasan por una serie de transformaciones que se dividen en generaciones. A la par se observa que existen dos líneas de desarrollo bien marcadas, esto se da por la competencia en desarrollo tecnológico entre Estados Unidos y Europa, lo que desembocó en una serie de estándares por separado, donde se tomaron los estándares europeos de los sistemas celulares para llegar al actual LTE y su evolución LTE-A. [2]

Para entender de mejor manera el sistema LTE, se hace una breve revisión de sus tecnologías antecesoras:

1.2.1. Primera Generación (1G) [2]

Esta generación celular se caracteriza por tener canales de voz con tecnología analógica, la calidad de enlace es muy baja, el handover impreciso y no existen seguridades. En las especificaciones técnicas se denota que utiliza FDMA; en un espacio corto de tiempo el canal es asignado solamente a un usuario, tiene un ancho de banda total de 50MHz dividido en 25MHz para uplink y 25MHz en downlink.

1.2.2. Segunda Generación (2G) ^[2]

Es la primera evolución donde la tecnología celular cambia a canales de voz digitales, en esta generación existen 3 tecnologías predominantes, dos de las cuales son estadounidenses y toman el nombre de sus estándar IS-95A y IS-136, tienen como particularidad utilizar técnicas CDMA y TDMA, mientras que por el lado europeo se construye el estándar GSM (*Global System for Mobile Communications*), el cual tiene una gran aceptación, por la portabilidad que ofrece debido a su tarjeta SIM, lo cual permite cambiar de terminal sin inconvenientes.

La segunda generación ofrece servicios adicionales al de voz como son: modo sleep que permite ahorro de energía, handover asistido por el móvil, identificador de llamadas, autenticación, SMS (Servicio de mensajes cortos) y permite acceso a servicios de internet por WAP (Protocolo de aplicaciones inalámbricas). ^[3]

Para la conceptualización de las principales características técnicas de los estándares de segunda generación (2G), se presenta la Tabla 1.1:

Tecnología	GSM	IS-136	IS-95
Año de Presentación	1990	1991	1993
Método de Acceso	TDMA	TDMA	CDMA
Banda de transmisión de la Estación Base en (EEUU)	935 – 960 MHz	869 – 894 MHz	869 – 894 MHz
Banda de transmisión de la Estación Móvil en (EEUU)	890 – 915 MHz	824 – 849 MHz	824 – 849 MHz
Separación entre canales	45 MHz	45 MHz	45 MHz
Ancho de Banda del Canal	200 KHz	30 KHz	1250 KHz
Número de canales full dúplex (permite Tx y Rx en simultáneo)	125	832	20
Máxima potencia del Móvil	20 W	3 W	0.2 W
Usuarios por canal	8	3	35
Modulación	GMSK	$\pi/4$ DQPSK	QPSK
Velocidad de Tx de la portadora	270.8 kbps	48.6 kbps	14.4 kbps

Tabla 1.1: Comparación de Tecnologías (2G) ^[3]

Tecnología	GSM	IS-136	IS-95
Codificador de Voz	RPE – LTP	VSELP	QCELP
Velocidad de codificador de Voz	13 kbps	8 kbps	8, 4, 2, 1 kbps
Tiempo de trama	4.6 ms	40 ms	20 ms
Control de codificador de Voz	Convolucional 1/2	Convolucional 1/2	Convolucional 1/2, 1/3

(Continuación) Tabla 1.1: Comparación de Tecnologías (2G)

1.2.2.1. Evolución a 2.5G ^[3]

En la Figura 1.1 se observa la evolución de GSM a una tecnología más avanzada de acuerdo a la necesidad de los abonados móviles, dando paso a GPRS (*General Packet Radio System*), donde se introducen servicios sobre conmutación de paquetes, proporcionando mayores velocidades, asignando calidad de servicio (QoS) en sistemas móviles y separando la red en una parte de voz de la cual se encarga GSM y una parte de datos de la cual se encarga GPRS, dando una coexistencia entre estas tecnologías.

En las características de GPRS se especifica el método de acceso basado en TDMA, el cual permite la utilización de voz y datos a través del dispositivo móvil, puede alcanzar teóricamente velocidades de 171.2 Kbps, además de disminuir el tiempo de conexión de la llamada, SMS más extensos y la facturación está basada en volumen de datos.

1.2.2.2. Evolución a 2.75G ^[3]

Continuando con la evolución de la tecnología celular, se tiene que Estados Unidos desarrolló la tecnología cdma 2000-1x, que utiliza la técnica de acceso CDMA, con una plataforma multimedia avanzada, aumentando la capacidad de servicio y siendo compatible con sus versiones anteriores. Por otro lado, Europa desarrolló una nueva evolución de GPRS a EDGE (*Enhanced Data Rates for Global Evolution*), donde su principal cambio era el aumento en la velocidad de transmisión.

Entre las principales características de EDGE, se tiene mejoras en el acceso a Internet, soporta juegos con mayor resolución de gráficos, permite MMS (Mensajería Multimedia) y entrega/recepción de emails.

En la Tabla 1.2 se presenta la comparación entre GPRS y EDGE.

Tecnología	GPRS	EDGE
Modulación	GMSK	8 – PSK / GMSK
Velocidad de Símbolo	270 kbaudios	270 kbaudios
Velocidad de datos por usuario en una ranura	21.4 kbps	59.2 kbps
Velocidad de trama	171.2 kbps	384 kbps

Tabla 1.2: Comparación GPRS vs. EDGE [4]

1.2.3. Tercera Generación (3G) [5]

La tecnología celular continuó su evolución, obteniendo la denominada tercera generación, con mayor velocidad de transmisión:

Por parte de Estados Unidos, el desarrollo celular desembocó en dos estándares Cdma2000-1x EV-DO (*Evolution-Data Only*) y Cdma2000-1x EV-DV (*Evolution-Data / Voice*), esta evolución presentó una alta velocidad de datos y es compatible con los sistemas anteriores.

Las principales características técnicas son: es una tecnología bastante flexible, utiliza técnica de acceso CDMA, tiene las portadoras espaciadas 1.25MHz, la velocidad de uplink es de 150Kbps y la velocidad de downlink es de 2.4Kbps.

Por parte de Europa se desarrolló la tecnología llamada UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*), la cual aumentó la velocidad de transmisión para ofrecer mayores beneficios, los mismos que van de la mano con el desarrollo de nuevos terminales con más funciones.

IMT-2000 es el estándar para redes de tercera generación, que permitió desarrollar UMTS para soportar nuevos servicios y alto nivel de integración con dispositivos que soportan el protocolo IP. Permite dos clases de accesos de radio W-CDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) o UTRA - FDD (UMTS

Terrestrial Radio Access – Frequency Division Duplexing) y UTRA - TDD (*UMTS Terrestrial Radio Access – Time Division Duplexing*).

Los parámetros técnicos de los estándares de UMTS se los resume en la Tabla 1.3.

Parámetros	UTRA – FDD	UTRA – TDD
Técnica de Acceso	WCDMA	WCDMA + TDMA
Velocidad de Chipping	3.84 Mcps	
Espaciamiento entre portadoras	4.4 - 5 MHz (200 KHz espaciado)	
Duración de Trama	10 ms	
Número de slot por trama	15	
Sincronización con BTS	No requiere	No requiere (opcional)
Modulación	DL: QPSK UL: Dual-core BPSK	DL: QPSK UL: QPSK
Coherencia en Recepción	uplink y downlink	
Multi – Velocidad	Variable SF + Multi – code + Multi – slot	

Tabla 1.3: Parámetros técnicos de los estándares de UMTS [2]

Las ventajas de 3G son:

Conexión a Internet eficaz, capacidad de procesar datos multimedia, calidad de servicio (QoS), soporta gran variedad de terminales, permite transmisión de datos simétricos o asimétricos, roaming global y flexibilidad a introducción de nuevos servicios.

1.2.4. Evolución HSPA (3.5G) [5]

Una posterior evolución de la tecnología UMTS con acceso WCDMA hacia 4G es HSPA (*High Speed Packet Access*) y HSPA+.

HSPA fue estandarizado por 3GPP, como se lo determina en su Release 5, a partir del cual continuó sus evoluciones como se lo observa en la Figura 1.2.

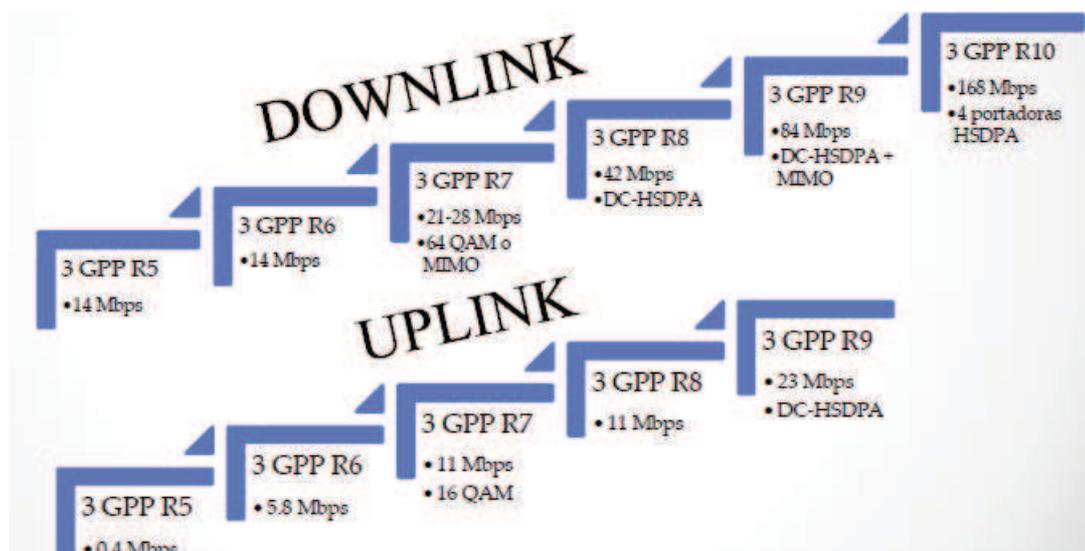


Figura 1.2: Evolución de HSPA [2]

La evolución de HSPA se da por Releases, presentados a continuación: [5]

R5 Release 5. - Se introduce HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*), con una velocidad de 14 Mbps.

R6 Release 6.- Se introduce HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*), con una velocidad de 5.8 Mbps y soporta servicios en tiempo real.

R7 Release 7.- Se conoce como la evolución de HSPA+ estándar, sus velocidades máximas en el downlink 28 Mbps y en uplink el 11 Mbps. Mejora la calidad de los servicios, aplicaciones y disminuye la latencia.

R8 Release 8.- Continúa mejorando la velocidad en el downlink hasta 42 Mbps y mantiene la velocidad de transmisión en el uplink de 11Mbps.

R9 Release 9.- Se introduce la técnica MIMO que ayuda a potenciar de mejor manera las velocidades de transmisión alcanzando en el downlink los 84 Mbps y en el uplink 23 Mbps.

R10 Release 10.- Es la evolución de HSPA+, alcanzando una velocidad en el downlink teórica de 168Mbps, con una técnica MIMO de 2x2.

El siguiente salto en la evolución de los sistemas móviles a cuarta generación (4G) es la tecnología *Long Term Evolution* y su posterior evolución a LTE-A, la cual se define como tecnología de cuarta generación.

1.3. Tecnología *Long Term Evolution* (LTE) ^[6]

La tecnología *Long Term Evolution* (LTE) fue estandarizada por el 3GPP en el Release 8, donde se describe el proyecto “*System Architecture Evolution*” (SAE), que es un sistema basado completamente en IP, proporcionando a los usuarios mayor velocidad de transmisión, lo cual permite tener la información en cualquier momento y en cualquier lugar desde un dispositivo móvil, aportando a la convergencia de redes con calidad de servicio (QoS) y alta seguridad en la protección de la información.

La tecnología LTE, proporciona un servicio de alta disponibilidad con una buena velocidad de transmisión, capaz de reproducir videos de HD y mantener videoconferencias en tiempo real que satisfacen los requerimientos de los usuarios del sistema celular en la actualidad.

En la Tabla 1.4, se compara las velocidades de transmisión de los diferentes sistemas celulares hasta llegar a LTE, la cual es superior a sus antecesoras.

Sistema de comunicación	Velocidad de transmisión de datos (DL)
GSM	9,6 kbps
GPRS	21,4 kbps
HSPA	14,4 Mbps
HSPA+	28 Mbps
LTE	100 Mbps

Tabla 1.4: Velocidades de transmisión en enlace descendente ^[6]

1.3.1. Esquema básico de transmisión

La tecnología LTE es una red móvil simplificada de alto rendimiento, que fue desarrollada para la banda de 2600 MHz pero para su implementación se lo puede realizar en bandas de 700 MHz, 800 MHz, 1700 MHz, 1900MHz y 2100MHz. LTE utiliza en su interfaz aire tecnologías de acceso multiportadoras, como las descritas a continuación: para enlace el descendente (*downlink*) utiliza *Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access* (OFDMA) y para el enlace ascendente (*uplink*) utiliza *Single Carrier – Frequency Division Multiple Access*

(SC-FDMA), estas técnicas son detalladas en el segundo capítulo. Además, LTE incorpora la técnica MIMO, que permite la utilización de múltiples antenas y utiliza esquemas de modulación de tres tipos: QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*), 16-QAM (*16 Quadrature Amplitude Modulation*) y 64-QAM (*64 Quadrature Amplitude Modulation*).

Con respecto al espectro, LTE provee flexibilidad en el ancho de banda, por lo cual incrementa su eficiencia espectral.

1.3.2. Requerimientos del sistema LTE ^[116]

Para que un sistema se considere como LTE debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Mínimos retardos en establecimiento de conexión
- Minimizar latencia de transmisión
- Aumento de la eficiencia espectral
- Precisión en handover
- Menor consumo de energía en el terminal
- Flexibilidad en el uso del espectro
- Esquema de antenas MIMO avanzadas
- Servicios de difusión
- Calidad de servicio: garantizar calidad de servicio extremo a extremo en voz sobre IP (VoIP).
- Buenas velocidades de transmisión

LTE también toma en cuenta los parámetros de capacidad que son:

- Alto rendimiento de eficiencia espectral por celda (*Average cell spectral efficiency*) medida en [bps / Hz / celda].
- Alto rendimiento de eficiencia espectral por usuario (*Cell edge spectral efficiency*) medida en [bps / Hz / usuario].

En la Tabla 1.5 se muestran las especificaciones técnicas de LTE en el Release 8.

		Release 8	Comentarios
Downlink	Velocidad de Transmisión	> 100 Mbps	LTE en 20 MHz FDD.
	Eficiencia Espectral	> 5 bps / Hz	
	Rendimiento de Eficiencia espectral por celda	> 1.6 – 2.1 bps / Hz / Celda	LTE: MIMO 2 x 2
	Rendimiento de Eficiencia espectral por usuario	> 0.04 – 0.06 bps / Hz / usuario	Cerca de 10 usuarios por celda
	Eficiencia Espectral en Broadcast	> 1 bps / Hz	Portadoras dedicadas en modo de difusión.
Uplink	Velocidad de Transmisión	> 50 Mbps	LTE en 20 MHz FDD.
	Eficiencia Espectral	> 2.5 bps / Hz	
	Rendimiento de Eficiencia espectral por celda	> 0.66 – 1.0 bps / Hz / Celda	LTE: MIMO 2 x 2
	Rendimiento de Eficiencia espectral por usuario	> 0.02 – 0.03 bps / Hz / usuario	Cerca de 10 usuarios por celda
Sistema	Latencia	< 10 ms	Referencia de estándar
	Retardo en la conexión	< 100 ms	Cambio de Estado
	Ancho de Banda	1.4 – 20 MHz	Flexibilidad de Ancho de Banda
	Capacidad de VoIP	Soporta VoIP > 60 sesiones / MHz / celda	

Tabla 1.5: LTE Release 8 ^[6]

1.3.2.1. Eficiencia espectral LTE ^[6]

Para el mejor aprovechamiento y uso del espectro radioeléctrico, se utiliza la técnica llamada diversidad espacial, donde se manifiesta la utilización de arreglo de antenas para la transmisión y recepción de datos, con la tecnología LTE se utiliza sistemas MIMO (Múltiples antenas de entrada Múltiples antenas de salida).

La eficiencia espectral (δ) en comunicaciones es definida como la capacidad de transmisión máxima dividido para el ancho de banda asignado para cada usuario, así se tiene.

Para el downlink:

$$\delta = \frac{V_{tx}}{AB} = \frac{100 \text{ Mbps}}{20 \text{ MHz}} = 5 \text{ bps/Hz}$$

Para el uplink:

$$\delta = \frac{V_{tx}}{AB} = \frac{50 \text{ Mbps}}{20 \text{ MHz}} = 2.5 \text{ bps/Hz}$$

Datos corroborados en la Tabla 1.5, tomando en cuenta que el sistema MIMO utilizado en LTE Release 8 es de 2 x 2, se considera que para tener una mejor eficiencia en la evolución del sistema está diseñado para utilizar un MIMO de 4 x 4 donde se utiliza cuatro antenas en transmisión y cuatro antenas en recepción.

Además, LTE es capaz de operar en una amplia gama de bandas de frecuencia y en diferentes tamaños de asignaciones de espectro, tanto en el enlace ascendente así como en el enlace descendente. LTE puede utilizar la asignación de espectro (Ancho de Banda) que va desde 1,4 MHz hasta 20 MHz (Recomendado) y aborda todas las bandas actualmente identificadas para los sistemas IMT, incluyendo las bandas menores a 1 GHz.

Un factor muy importante de la tecnología LTE, es que no solo se enfoca en el aumento de velocidad de transmisión, sino también en factores que lo complementan y hacen robusto a un sistema, como es la cobertura e interferencias.

1.3.2.2. Parámetros de instalación ^{[1][6]}

Entre los parámetros para cumplir con los requisitos del sistema LTE dependen varios aspectos de cada lugar de instalación como son: el medio ambiente, los modelos de tráfico, modelos de canal y la configuración del sistema, dando como resultado que cada uno de los usuarios tengan por lo menos 100 Mbps de velocidad transmisión, para cumplir con los requisitos de esta tecnología.

La implementación en diversos escenarios proyectan que los sistemas LTE pueden ser instalados en macroceldas con separaciones entre estaciones base de 500 m a 1.7 Km, así como también pueden ser instalados en microceldas con separación entre estaciones base de 130 m. Cabe decir que los valores señalados anteriormente solo son de referencia, pues para la instalación en un lugar determinado se debe realizar estudios topológicos para que toda el área tenga cobertura.

Con respecto a la movilidad de terminales, LTE garantiza su estándar en velocidades de 350 Km/h hasta 500 Km/h, dependiendo de la banda de frecuencia.

Para cumplir con estos estándares descritos anteriormente, se requiere precisión en Handover (el traspaso de una celda a otra) debe ser sin interrupciones, con retardos imperceptibles, sin pérdida de paquetes para las llamadas de voz y fiable en la transmisión de servicios de datos.

1.3.2.3. Servicio de VoIP en LTE ^[6]

Es importante establecer los requisitos de capacidad del sistema para este tipo de servicios, por ser un sistema basado totalmente en conmutación de paquetes.

El principal requisito se refiere al número de usuarios concurrentes de VoIP, dado un modelo de tráfico particular y restricciones de retardo.

En este sistema, un usuario de VoIP se considera que está en interrupción (es decir, se cae la comunicación) si hay más del 2% de los paquetes que no llegan con éxito al receptor y por lo tanto se desecha la comunicación. Esto supone un

retardo de extremo a extremo en general (desde un terminal móvil a otro terminal móvil) debe ser menor a los 200 ms.

1.3.2.4.Servicios de difusión ^[6]

LTE, como se lo ha mencionado, es un sistema convergente que permite servicio de televisión móvil y otros servicios de difusión multimedia MBMS (*Multimedia Broadcast/Multicast Services*), con estándares de eficiencia espectral de difusión donde se establece mínimo 1 bps/Hz.

1.3.2.5.Control de establecimiento de conexión ^[6]

En el sistema LTE se requiere que los retardos sean mínimos en el establecimiento de conexión en comparación con los sistemas celulares anteriores. Para una mejor comunicación y aumento de la vida de las baterías de los terminales, LTE permite una rápida transición de un estado inactivo a un estado activo, colaborando con los terminales a pasar más tiempo en el estado de reposo.

1.3.2.6.Interoperabilidad ^[6]

LTE es un sistema atractivo para su migración por la flexibilidad del espectro e interoperabilidad con los sistemas anteriores, además de la adaptación a una variedad de escenarios para su operatividad.

LTE se basa en una red de conmutación de paquetes evolucionado que permite la interoperabilidad con varias tecnologías de acceso, en particular con las tecnologías 3GPP anteriores (GSM / EDGE y UTRAN), así como las tecnologías no 3GPP (por ejemplo WiFi, CDMA2000 y WiMAX).

Sin embargo, la confiabilidad del servicio sólo se puede garantizar si se realiza la migración de todos sus componentes a tecnología LTE.

1.4. LTE Release 9 ^[7]

La evolución de LTE continúa con su Release 9, donde sus principales cambios son:

- Mejora en la velocidad de transmisión
- Mejora en Servicios Multicast difusión multimedia (MBMS)
- MIMO mejorado
- Precisión en posicionamiento de LTE
- PWS (sistema de alerta pública)

1.4.1. Cambios producidos en Release 9

Para cumplir con estos cambios, el Release 9 realiza un upgrade exclusivamente en el software, pues la arquitectura de la red y sus elementos son los mismos que para LTE Release 8.

1.4.1.1. Mejora en la velocidad de transmisión

El Release 9 de LTE presenta una mayor velocidad de transmisión, lo cual permite tener un enlace descendente (*downlink*) con velocidad de 300Mbps y para el enlace ascendente (*uplink*) alcanza una velocidad de 75Mbps. Dando una mejora en la eficiencia espectral por el aumento en la velocidad de los enlaces.

1.4.1.2. Mejora en Servicios Multicast difusión multimedia (MBMS)

La mejora de la velocidad y calidad de transmisión, permiten soportar televisión móvil de muy alta definición como es el Full HD.

1.4.1.3. MIMO mejorado

Para cumplir con los objetivos de aumentar la velocidad de datos, la gran capacidad del sistema y mayor cobertura de cada celda. MIMO mejorado es una de las tecnologías fundamentales para alcanzar esta meta, específicamente para mejorar el rendimiento de la celda, aumentando el arreglo de antenas en transmisión y en recepción.

1.4.1.4. Precisión en posicionamiento de LTE ^[7]

El Release 9 mejora la precisión en la ubicación del terminal, con el sistema mundial de navegación por satélite, que actualmente viene integrado en los equipos móviles con tecnología LTE, con este sistema de posicionamiento reduce el tiempo de ubicación y reduce consumo de energía en comparación al Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

1.4.1.5. PWS (Sistema de Alerta Pública) ^[7]

Este estándar se preocupa por el desarrollo del servicio de alertas públicas como son notificaciones sociales o información crítica acerca de desastres naturales y otras situaciones de emergencia, en información masiva para prevención de la salud y vida de los abonados.

1.4.2. Categorías de equipos finales soportados LTE (Release 8-9)

Existen varios tipos de equipos finales o equipos de usuario definidos por categorías para LTE Release 8-9, estos equipos son definidos por las velocidades en los enlaces ascendentes y descendentes, como se muestra en la Tabla 1.6.

	Categorías de Equipos de usuario				
	1	2	3	4	5
Velocidad de downlink (Mbps)	10	50	100	150	300
Velocidad de uplink (Mbps)	5	25	50	50	75
Número de antenas en recepción	2	2	2	2	4
Número de antenas en transmisión	1	2	2	2	4
Modulación 64 QAM en downlink	Si	Si	si	si	Si
Modulación 64 QAM en uplink	No	No	no	no	Si
Requerimiento de memoria (MB)	1	4.9	4.9	7.3	14.6

Tabla 1.6: Categorías de equipos finales de LTE en Releases 8 y 9 ^[6]

En LTE, los equipos de usuario (UE), no solo se limitan a teléfonos inteligentes de pequeño tamaño, también pueden ser incorporados en dispositivos de gran tamaño como los computadores portátiles dependiendo de la disponibilidad de red en cada país, pues los equipos LTE conservan la portabilidad en una tarjeta USIM (*Universal Subscriber Identity Module*) de pequeñas dimensiones.

1.5. LTE-Advanced (Release 10) ^[8]

LTE *Advanced* está descrito en el Release 10, con parámetros establecidos bastante superiores al Release 9, por lo cual UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) la considera una tecnología 4G, pues tiene mejoras en la agregación de portadoras, permitiendo que el ancho de banda de transmisión total se incremente hasta 100 MHz, lo que provocó mayor velocidad en los enlaces y mejor eficiencia espectral a lo establecido en LTE.

La transmisión de enlace ascendente con MIMO llega a eficiencias espectrales pico en el enlace ascendente de hasta 15 bps/Hz y en el enlace descendente se obtiene eficiencias espectrales de hasta 30 bps/Hz.

Las principales características impuestas por IMT-Advanced (*International Mobile Telecommunications - Advanced*) son:

- Un alto grado de funcionalidad para todos los usuarios, conservando la flexibilidad para soportar una amplia gama de servicios y aplicaciones de una manera eficiente.
- Capacidad de interconexión con otros sistemas.
- Soporte de servicios móviles, equipos de usuarios de alta calidad, facilidad para uso de aplicaciones y capacidad de roaming mundial.

Las tasas de transmisión de datos incrementaron su capacidad para soportar servicios avanzados y aplicaciones, en el downlink llega a una velocidad de transmisión de 1 Gbps, mientras que en el uplink la velocidad llega hasta 100Mbps alcanzando los objetivos de LTE *Advanced* (4G).

Los aspectos más representativos de la tecnología LTE-A se resumen en la Tabla 1.7.

Parámetros	Downlink	Uplink
Máximo Ancho de Banda	Hasta 100 MHz	
Velocidad de Transmisión (Mbps)	1000	100
Eficiencia Espectral Pico (bps/Hz)	30	15
Rendimiento de Eficiencia espectral por celda (bps/Hz/celda)	2.6	2
Rendimiento de Eficiencia espectral por usuario (bps/Hz/usuario)	0.09	0.07
Capacidad de VoIP	Soporta VoIP > 60 sesiones / MHz / celda	
Latencia (ms)	10	
Tiempo de conexión (ms)	50	

Tabla 1.7: Release 10 LTE-A ^[8]

1.5.1. Características de LTE-A

LTE-*Advanced* no se limita al LTE Release 10, como es una tecnología para larga evolución, sigue innovando sus características anualmente, lo que se describe en un nuevo Release.

A continuación se analizan las características de la tecnología LTE *Advanced*: ^[8]

1.5.1.1. Agregación de portadoras

LTE *Advanced* usa la técnica llamada agregación de banda o portadora, la cual permite la agregación de hasta cinco portadoras de 20 MHz para obtener un ancho de banda de transmisión de 100 MHz, permitiendo una perfecta compatibilidad con el Release 8 denominado LTE.

El dilema en Ecuador es que actualmente ningún operador celular posee 100MHz de espectro continuo, todos los proveedores de servicio tienen bloques de frecuencia en bandas diferentes. Por ende, para poder soportar LTE *Advanced*

debe haber flexibilidad en el uso del espectro disponible, es decir que la tecnología *LTE Advanced* puede tener 100MHz de Ancho de Banda en espectro contiguo y en espectro no contiguo.

1.5.1.2. Mejora del enlace descendente y ascendente con la transmisión de múltiples antenas (MIMO) ^[8]

Para incrementar las velocidades de los enlaces, como es la característica fundamental de *LTE Advanced*, es necesario mejorar la capacidad del sistema MIMO. En el enlace descendente MIMO puede tener un arreglo de antenas de hasta 8x8 para un único usuario, mientras que para el enlace ascendente MIMO puede tener un arreglo de antenas de hasta 4x4 para un mismo usuario, como se muestra en la Figura 1.3.

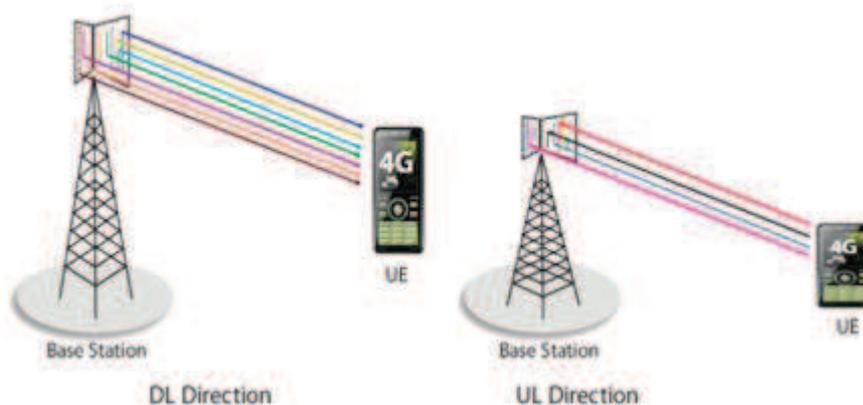


Figura 1.3: MIMO en LTE-Advanced ^[8]

1.5.1.3. *Nodos Relay* ^[5]

En el Release 10 se introduce el concepto de *Nodos Relay*, estos nodos de red adicionales están diseñados para complementar una macro-celda de LTE, ampliando la cobertura y aumentando la capacidad.

Los *Nodos Relay* realizan la función de amplificar la señal recibida de radiofrecuencia desde una estación base. En comparación con una estación base de LTE, los *Nodos Relay* tienen un costo más bajo, ya que no realizan el procesamiento de la señal. Se suelen utilizar para mejorar la cobertura en las

zonas donde el tráfico es demasiado denso o donde el acceso a la red es complicado.

El principal inconveniente de los *Nodos Relay* es que, por ser repetidores, no solo amplifican la señal de LTE, sino amplifican cualquier señal recibida, por ese motivo la señal es degradada en comparación con una estación base regular.

Una característica importante del *Nodo Relay* (RN), es que están bajo el control total de la red de acceso, lo que permite monitorearlos remotamente, tal como si fuese una estación base de LTE.

1.5.1.4. Compatibilidad con versiones anteriores

LTE-*Advanced* se define como una evolución de LTE, que también se puede implementar en nuevas bandas. Por lo tanto, uno de los objetivos principales de esta tecnología fue la compatibilidad entre LTE Release 8 con LTE Release 10 y para las tecnologías futuras. Este es un requisito importante para dar confianza a las operadoras celulares para desplegar LTE y poder realizar actualizaciones sobre la red, pues los operadores celulares con LTE al mejorar su red a LTE-*Advanced*, podrán realizarlo sin tener que cambiar su infraestructura base.

1.5.2. Categorías de equipos de usuarios LTE-*Advanced* ^[5]

Existen varias clases de equipos de usuario definidos por categorías para LTE-*Advanced*, de acuerdo a las máximas velocidades de los enlaces, como se observa en la Tabla 1.8.

	Categorías de Equipos de usuario		
	6	7	8
Velocidad de downlink (Mbps)	300	300	3000
Velocidad de uplink (Mbps)	50	100	1500
Número de antenas en recepción	2 - 4	2 - 4	8

Tabla 1.8: categorías de UE soportados en la versión 10 ^[6]

	Categorías de Equipos de usuario		
	6	7	8
Número de antenas en transmisión	1 - 4	1 – 4	4
Modulación 64 QAM en downlink	Si	Si	Si
Modulación 64 QAM en uplink	No	No	Si
Requerimiento de memoria (MB)	14.6	14.6	144

(Continuación) Tabla 1.8: categorías de UE soportados en la versión 10

La categoría más alta de equipos finales, combina la agregación de cinco portadoras de 20 MHz con ocho antenas en sistema MIMO para el enlace descendente y cuatro antenas en el enlace ascendente, para cumplir con las especificaciones previstas por LTE-Advanced.

1.5.3. Comparación entre LTE y LTE-Advanced

En la Tabla 1.9 se muestra una comparación entre las principales características de LTE y LTE-Advanced.

Tecnología	LTE	LTE-A
Velocidad de datos máxima Down Link (DL)	150 Mbps	1.5 Gbps
Velocidad de datos máxima Up Link (UL)	75 Mbps	100 Mbps
Ancho de banda de transmisión (DL)	20 MHz	100 MHz
Ancho de banda de transmisión (UL)	20 MHz	40 MHz (requisitos según lo definido por ITU)
Movilidad	Optimizado para bajas velocidades (< 15 Km/hr), Alto rendimiento a velocidades de hasta (120 Km/hr) Mantener vínculos a velocidades de hasta (350 Km/hr).	Misma que en LTE

Tabla 1.9: Diferencias entre LTE y LTE-Advanced ^[9]

Tecnología	LTE	LTE-A
Cobertura	Rendimiento completo hasta 5 Km	a) Los mismos requisitos que LTE b) Debe ser optimizado o desplegado en zonas locales / entornos de micro celdas
Ancho de banda escalables	1.3, 3, 5 10, y 20 MHz	20-100 MHz
Capacidad	200 Usuarios activos por celda en 5 MHz	3 veces mayor que en LTE

(Continuación) Tabla 1.9: Diferencias entre LTE y LTE-Advanced

1.6. LTE-Advanced (Release 11) ^[9]

Este Release se denomina LTE *Advanced* mejorado, donde la principal novedad es la inclusión del sistema de Coordinación de transmisión / recepción Multi-Punto (CoMP), con el fin de mejorar aún más la eficiencia del espectro, especialmente en el borde de la celda, por lo que es considerado como una herramienta para mejorar la cobertura.

La principal contribución de CoMP se puede entender de la siguiente manera: Cuando un equipo de usuario está en la región borde de la celda con tecnología LTE-Advanced, puede ser capaz de recibir señales de múltiples celdas y viceversa. Teniendo en cuenta que, si la señalización transmitida desde las múltiples celdas se puede coordinar, el rendimiento en downlink puede aumentar significativamente.

La Coordinación de transmisión / recepción Multi-Point (CoMP) puede ocurrir en dos situaciones intra-site o inter-site como se muestra en la Figura 1.4.

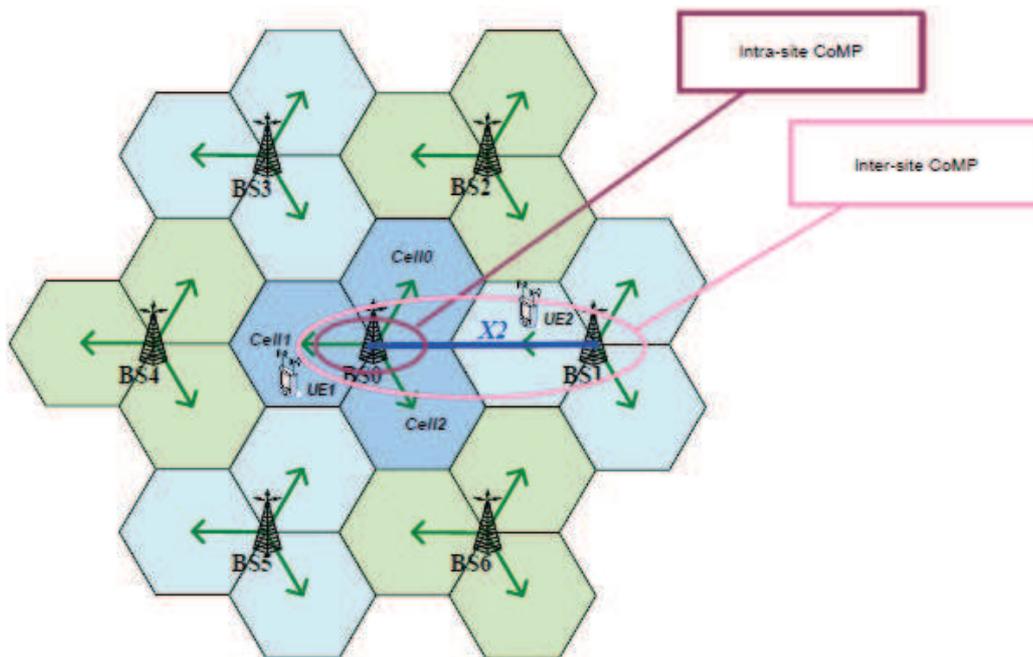


Figura 1.4: Ilustración de Inter-Site e Intra-Site CoMP [9]

Intra-Site: Este caso ocurre cuando el CoMP se produce dentro de un cluster (celdas con diferentes rangos de frecuencias).

Una ventaja de CoMP Intra-Site es la rapidez en el intercambio de información, pues esta comunicación se realiza en un mismo cluster y no implica el proceso de backhaul (conexión entre las estaciones de base).

Inter-Site: Este caso ocurre cuando la coordinación se produce entre clusters. Implica la coordinación de múltiples sitios con su estación base para la transmisión del CoMP. En consecuencia, el intercambio de información incluirá el proceso de backhaul.

1.7. LTE - (Release 12) [10]

Long Term Evolution (LTE) es una tecnología de larga evolución que continua actualizándose y se encuentra en la realización de su Release 12, el mismo que se dará a conocer como LTE-B (LTE-Beyond).

1.7.1. Posibles mejoras LTE - B

LTE – B, pese a que todavía está en creación, se han presentado algunos borradores donde se afirma que los principales puntos a mejorar son:

1.7.1.1. Celdas más pequeñas / Mejoras en Redes Heterogéneas ^[10]

Se espera que las celdas sean más pequeñas y las redes heterogéneas tengan un papel cada vez más importante en el futuro, para satisfacer la creciente demanda del tráfico de datos, provocando mejoras en los accesos locales, conservando una topología de red adaptativa con nodos de baja potencia y utilizando el espectro de altas frecuencias.

1.7.1.2. Mejoras en la interconexión de LTE/WIFI ^[10]

La tecnología WiFi se encuentra en estrecha cooperación con redes celulares. Actualmente, la detección de una red WiFi en un teléfono inteligente, se lo realiza a nivel de usuario final de forma manual, donde el usuario elige la red wifi o red de datos, mientras que con la convergencia de redes en LTE se espera que la operadora, dependiendo del tipo de tráfico y de la disponibilidad, seleccione automáticamente la red, como se ilustra en la Figura 1.5.

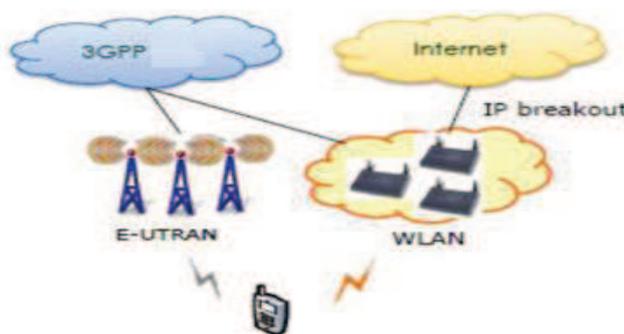


Figura 1.5: Niveles de integración LTE-WiFi. ^[10]

Esto permite que la funcionalidad de las redes sea más inteligente, además se considera la carga de la celda, para no saturarla y se usa calidad de servicio.

1.7.2. Cuadro de posibles beneficios del Release 12 ^[10]

En la Tabla 1.10 se describen los beneficios del Release 12.

Beneficios de 3 GPP Release 12- Aumento del rendimiento	
Función del Release 12	Beneficio
Mejora de celdas pequeñas basado en Inter-site	<ul style="list-style-type: none"> • Optimización de celdas pequeñas mediante la reducción de señalización entre la red de acceso radio al núcleo de la red. • Mejora de las tasas de datos mediante el uso de pequeñas celdas. • Uso eficiente del espectro TDD.
Receptores avanzados	<ul style="list-style-type: none"> • Disipación de la interferencia, para aumentar la capacidad del enlace ascendente y del enlace descendente
Mejora del enlace downlink coordinado multi-punto (DL CoMP)	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura mejorada mediante la coordinación en caso de un entorno no ideal

Tabla 1.10: Beneficios de 3GPP Release 12 ^[10]

1.8. Arquitectura de red LTE ^[11]

1.8.1. Visión general de la arquitectura LTE

La Arquitectura LTE soporta tráfico de conmutación de paquetes en una plataforma completamente IP, permitiendo su implementación a partir de la compatibilidad total con sus tecnologías anteriores, además de ser una red convergente y rentable por ser un sistema de larga evolución denominado EPS (*Evolved Packet System*), como se ilustra en la Figura 1.6.

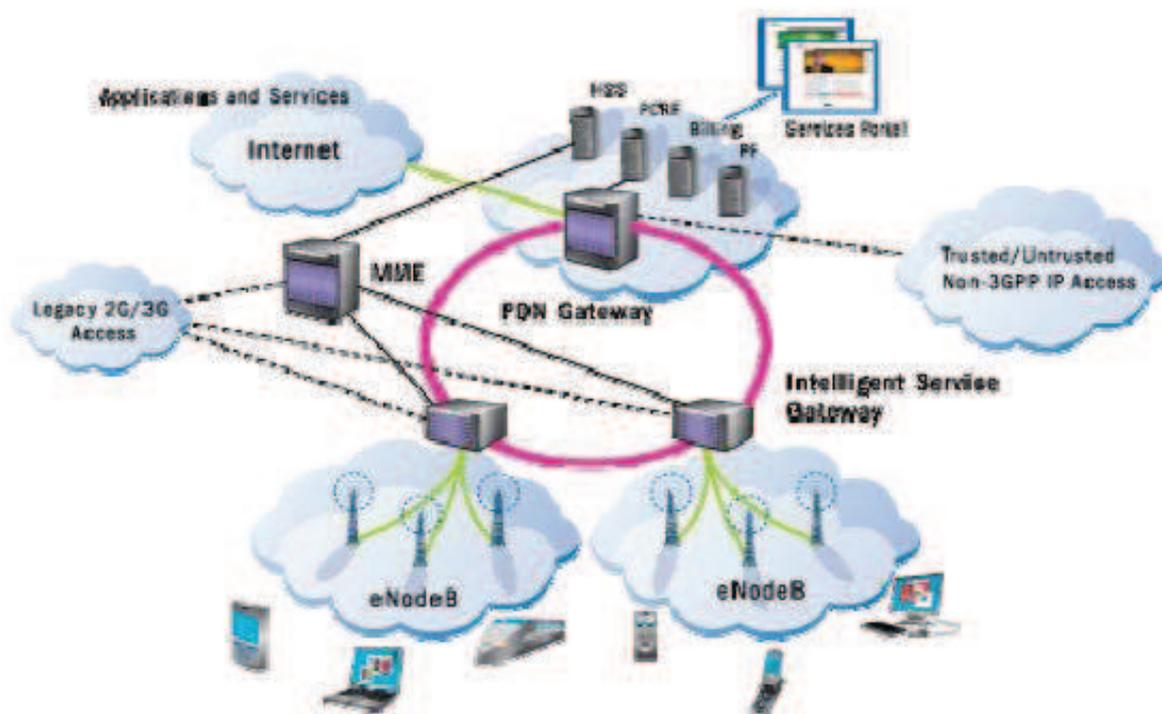


Figura 1.6: Esquema general de la arquitectura LTE ^[11]

En general, la arquitectura LTE es plana y simple, pues está compuesta de dos elementos esenciales: una red de acceso mejorada en comparación a sus tecnologías antecesoras la cual recibe el nombre de E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*) y la parte central de la red denomina EPC (*Evolved Packet Core*), como se muestra en la Figura 1.7.

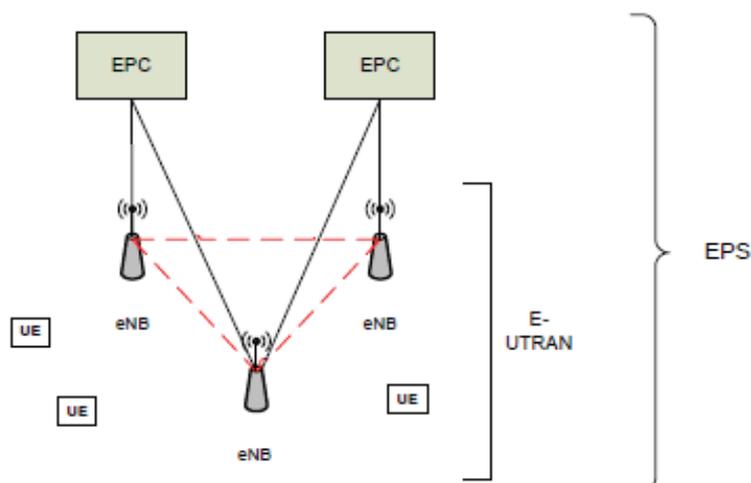


Figura 1.7: Arquitectura simplificada LTE ^[12]

Los beneficios que brinda la Arquitectura de LTE son: ^[12]

- La reducción de latencia debido a la mejora del acceso de radio y la simplificación en la estructura provoca la disminución de los elementos en su infraestructura.
- Reduce los tiempos para el establecimiento de conexión de la llamada.
- Mejor calidad de servicio (QoS) en la plataforma IP.
- Precisión en el handover para mantener los servicios, cuando se produce el cambio de una celda a otra.
- Facilita la operación y mantenimiento de toda la red LTE.

Para el mejor entendimiento de la estructura de la arquitectura LTE, se muestra la Figura 1.8.

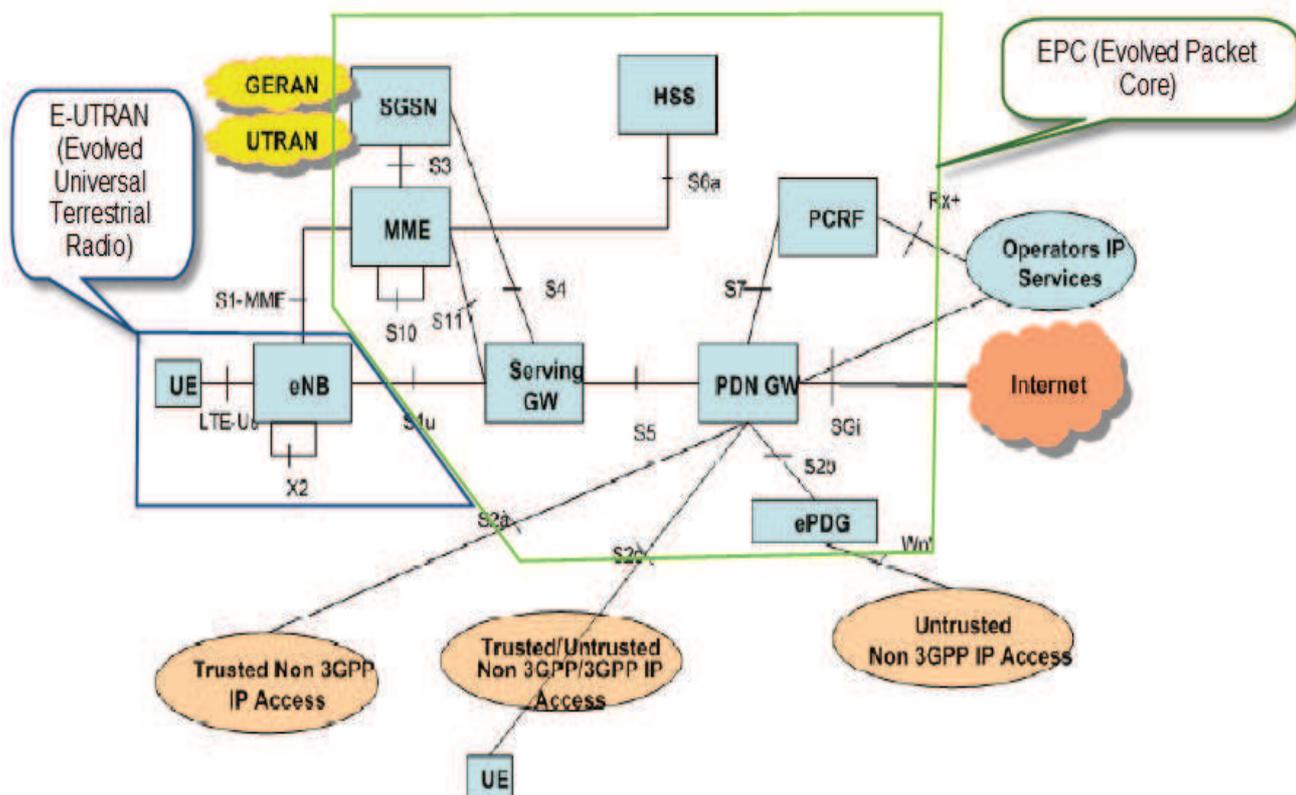


Figura 1.8: Arquitectura de red LTE ^[1]

MME= Entidad de Gestión de Movilidad

P-GW o PDN-GW = Compuerta de Enlace hacia Red de Paquetes

S-GW = Compuerta de Enlace de Servicio

HSS= Servidor de suscripción de abonados

PCRF = Servidor que ayuda al control de las políticas y reglas

eNB = Equipos de sus estaciones base de LTE

UE = Equipo de usuario

1.9. Núcleo de red LTE ^[12]

El Núcleo de Red también llamado EPC (*Evolved Packet Core*) es responsable del servicio de conectividad IP y control global del equipo de usuario.

Los principales nodos lógicos que constituyen el EPC son:

- Compuerta de enlace hacia la red de paquetes o *Packet Data Network Gateway* (P-GW o PDN-GW)
- Compuerta de enlace de servicio o *Serving Gateway* (S-GW)
- Entidad de gestión de movilidad o *Mobility Management Entity* (MME)

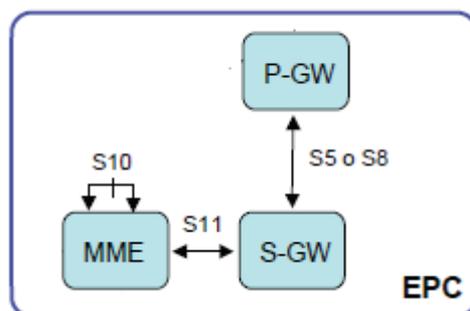


Figura 1.9: Arquitectura básica del núcleo de red (EPC) ^[12]

Como se puede observar en la Figura 1.9, el EPC está constituido de los 3 nodos lógicos que se encuentran unidos a elementos comunes para las redes 3GPP

incluyendo su base de datos principal del sistema llamada HSS (*Home Subscriber Server*), este conjunto de elementos proveen la conectividad IP entre los equipos de usuario conectados a través de la red de acceso (E-UTRAN) y las redes externas que conectan al núcleo de la red (EPC).

A continuación se detalla cada uno de los elementos que conforman el Núcleo de la Red LTE:

1.10. Entidad de gestión de movilidad (MME: *Mobility Management Entity*) ^[12]

El MME es el nodo principal de control, procesa la señalización entre el equipo de usuario y el núcleo de la red a través de la red de acceso E-UTRAN. MME es una entidad de señalización independiente donde se pueden aplicar criterios de balanceo de carga. MME procesa el registro del terminal para la comunicación, depende de la ubicación geográfica para ver a que MME se registra el equipo de usuario. Una de las funciones del MME es controlar un conjunto de eNBs. Los protocolos que funcionan en este nodo son conocidos como *Non-Access Stratum* (NAS), como se muestra en la Figura 1.10, donde se describe los módulos de la entidad de gestión de movilidad.

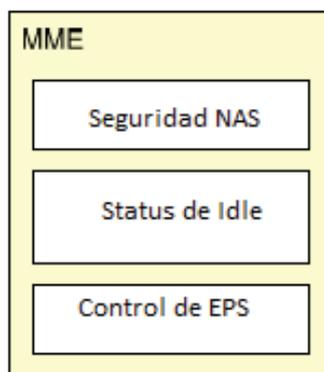


Figura 1.10: Separación funcional entre el eNB y MME ^[12]

Las funciones principales del nodo MME son:

1.10.1. Autenticación y autorización de acceso ^[12]

El nodo MME se encarga de realizar el proceso de control de acceso a la red, a partir de los datos de usuario obtenidos desde el HSS y compararlos con los datos obtenidos del equipo de usuario cuyo proceso para LTE se denomina *Authentication and Key Agreement (AKA)*, este proceso se describe en el anexo A III.

1.10.2. Gestión de movilidad de los usuarios en modo idle ^[12]

Se trata de equipos de usuario que no se conectan a través de la red acceso E-UTRAN, pero son registrados en la base de datos del Sistema LTE, por ende el nodo MME se encarga de hacer un seguimiento de la localización de los equipos de usuario dentro del área de servicio de la red. Para su posible conexión con el núcleo de la red. ^[12]

1.10.3. Roaming ^[12]

MME se encarga de que los usuarios puedan acceder a servicios de telecomunicaciones, a través de las redes de otros operadores con los que no tienen establecida ninguna suscripción, a este servicio se lo denomina Roaming.

1.10.4. Protocolos de señalización NAS (*Non Access Stratum*) ^[12]

Los protocolos NAS intervienen entre el equipo de usuario y la entidad MME que se tenga asignada. Por intermedio de estos protocolos funcionan procedimientos relacionados con las funciones de control de acceso a la red LTE, la gestión de las conexiones a redes externas y el establecimiento de servicios portadores EPS, además de la gestión de movilidad de los terminales que se encuentran en modo idle.

1.11. Compuerta de enlace de servicio (S-GW: *Serving Gateway*) ^[12]

Este nodo permite enrutar los paquetes de datos entre la EPC y la red de acceso E-UTRAN, es controlado por la MME, la misma que se comunica a través de la interfaz S11, también se encarga de convertir la señalización antigua SS7 en IP, en la Figura 1.11 se puede observar el módulo que compone a S-GW.

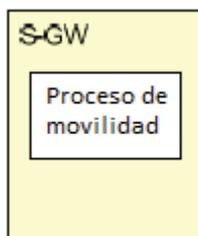


Figura 1.11: Separación funcional entre el eNB y SGW ^[12]

La principal función del S-GW es: ^[12]

Realizar el proceso de handover que es un proceso referido a la movilidad del usuario donde un equipo de usuario cambia de ubicación o punto de referencia sin perder el servicio de comunicación de acuerdo al nodo eNB que se encuentre registrado, el cambio puede ser entre nodos eNBs o entre nodos MMEs.

1.12. Compuerta de enlace hacia la red de paquetes de datos (P-GW: *PDN Gateway*) ^[12]

El nodo P-GW es el encargado de la conectividad entre la red LTE y las redes externas denominadas como *Packet Data Network* (PDN). P-GW toma los paquetes IP generados por el usuario y se los conecta con la red externa y viceversa, todo el tráfico IP dirigido a un terminal LTE proveniente de la red externa va a ser encaminado por el nodo P-GW, como ilustración de los módulos de P-GW se observa la Figura 1.12.

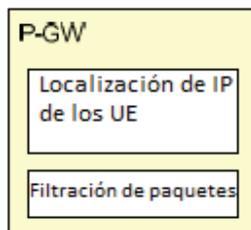


Figura 1.12: Separación funcional entre el eNB y PGW ^[12]

La principal función del P-GW es: ^[12]

Asignar las direcciones IP a los terminales que utilizan en una red externa. La dirección IP puede tener protocolo IPv4, IPv6 o bien los dos protocolos en dual stack.

1.13. Elementos comunes a las redes 3GPP ^[13]

Entre los elementos comunes que ayudan al funcionamiento del sistema LTE se tienen:

1.13.1. Servidor de suscripción de abonados (HSS: *Home Subscriber Server*) ^[13]

El *Home Subscriber Server* (HSS) es la mayor base de datos del sistema LTE, cumple con las funciones de HLR (*Home Local Register*) y AuC (Centro de Autenticación) en la tecnología antecesora GSM, en esta base de datos se almacenan la información de todos los usuarios de la red. La información contenida en el HSS es muy amplia abarca tanto información relativa a la suscripción e identidad del usuario, también contiene información necesaria para la operatividad de la red. La información que contiene la base de datos HSS solo puede ser modificada por procesos administrativos de la operadora de red. El HSS contiene tanto información permanente hasta la permanencia del suscriptor, así como información temporal que cambia por la operación propia del sistema. Los principales elementos de *Home Subscriber Server* (HSS) son:

- IMSI: *International Mobile Subscriber Identity*
- MSISDN: *Mobile Station Integrated Services Digital Network*
- ISDN: *Integrated Services Digital Network*
- Información de localización del usuario en la red
- Seguridad y cifrado (vectores de autenticación)

Todos estos elementos y la conexión directa con MME proporcionan el control e información necesaria para proveer al usuario de los servicios, de acuerdo con las condiciones establecidas en el contrato de suscripción.

1.13.2. (PCRF: Policy and Charging Rules Function) ^[13]

El PCRF es un servidor que ayuda al control de las políticas y reglas, para establecer y mantener la comunicación, también incluyen funciones de: *Proxy Call Session Control Function (P-CSCF)*, función de control de la llamada y *Policy and Charging Enforcement Function (PCEF)*, se encarga de aplicar balanceo de Carga. El PCRF proporciona la autorización de QoS (Identificador de clase de calidad de servicio), ayudando al flujo de datos seguro utilizando P-CSCF.

PCRF puede ser integrado con diferentes servicios como facturación, base de datos de suscriptores o también se puede implementar como una entidad independiente.

1.13.3. (OCS: Online Charging System) ^[13]

El OCS es un sistema de tarificación online o más conocido como carga en línea, es un proceso en el que se recoge información para su posterior cobro por el uso de los recursos de red. La autorización para el uso de los recursos de la red debe ser acordada antes del uso real del servicio. Esta autorización es concedida por el sistema de carga en línea a petición del usuario. Cuando se recibe una solicitud de uso de recursos de red por parte del usuario, la red reúne la información necesaria y genera un evento de carga hacia el servidor OCS en tiempo real. El OCS devuelve una autorización de uso de los recursos. La autorización de uso puede ser prepago o pospago de acuerdo al tipo de contrato con la operadora.

1.13.4. (OFCS: *Offline Charging System*) ^[13]

El OFCS es un sistema de tarificación offline es un proceso en el que se recoge información por el uso de recursos de red y cuando los recursos de la red expiran pueden seguir utilizando dichos recursos sin ningún inconveniente previo a una autorización offline de carga de recursos, los mismos que son transferidos posteriormente al sistema de facturación dependiendo de la utilización del servicio de red.

1.14. Interfaces pertenecientes al núcleo del sistema LTE ^[12]

Las principales interfaces en el Núcleo del sistema LTE son:

1.14.1. Interfaz (SGi)

Esta interfaz es utilizada para la interconexión entre el nodo P-GW y las redes externas. La red externa puede ser pública o privada. La interfaz SGi contribuye con la interconexión a redes IPv4 o IPv6.

Existen dos formas de interconexión de la red LTE con las redes externas con la interfaz SGi como se observa en la Figura 1.13.

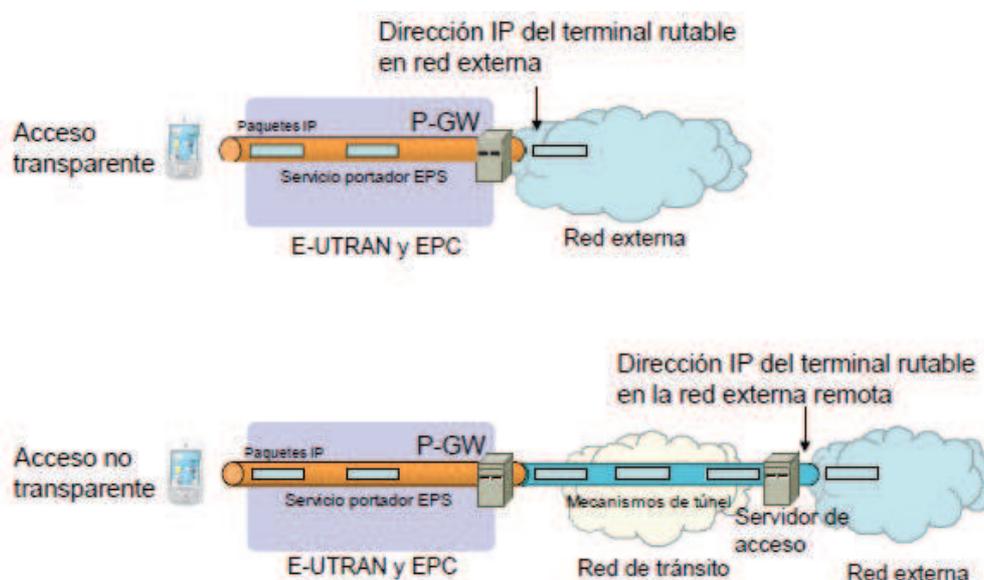


Figura 1.13: Tipos de interconexión a través de SGi ^[13]

Acceso Transparente: Cuando la interconexión se realiza a través de SGi, se asigna una dirección IP válida al equipo de usuario, la misma dirección va a ser visualizada por la red externa y el nodo P-GW para realizar la interconexión.

Acceso No Transparente: Cuando la interconexión se produce conectando la red LTE a través de un acceso remoto a una red externa de forma que el rango de direcciones IP utilizado por los terminales deben estar en el mismo rango de direcciones de la red externa. Por ende la conexión entre la red LTE y la red remota permite el establecimiento de un túnel IP entre el nodo P-GW y el servidor de acceso remoto.

1.14.2. Interfaces (S5 y S8) ^[14]

Las interfaces S5 y S8 son empleadas para la transferencia de paquetes entre los nodos S-GW y P-GW.

La interfaz S5 se utiliza para conectar los nodos P-GW Y S-GW, cuando estos nodos pertenecen a la misma EPC.

La interfaz S8 es utilizada para conectar el nodo S-GW perteneciente a una red con el nodo P-GW de otra red.

1.14.3. Interfaz (S11) ^[14]

Esta interfaz permite la conexión entre MME y S-GW. Por medio de está interfaz se puede realizar los procedimientos de creación, eliminación, modificación o cambio de los servicios portadores, es decir ayuda a la administración de la red.

1.14.4. Interfaz (S10) ^[14]

La interfaz S10 permite la comunicación entre dos nodos MME. Su principal función es contribuir con el mecanismo de reubicación de la entidad MME.

1.14.5. Interfaz (S6a) ^[14]

Esta interfaz permite la transferencia de información entre la base de datos HSS y el nodo de control MME. A través de la interfaz S6a se realizan algunas funciones como son:

- Mantenimiento de información y gestión de la localización.
- Autorización de acceso a la red LTE.
- Autenticación de los usuarios.
- Notificación y descarga de la identidad del usuario para realizar la conexión con la red.

1.14.6. Resumen de los elementos que constituyen el núcleo del sistema LTE ^[12]

En la Tabla 1.11, se indica un resumen de los elementos que conforman el núcleo del sistema LTE.

	Denominación	Descripción	Referencias 3GPP [®]
Entidades de red EPC	MME	Nodo que canaliza el plano de control de la red LTE	TS 23.401 [5]
	S-GW	Punto de anclaje del plano de usuario en la red troncal	TS 23.401 [14]
	P-GW	Pasarela para la interconexión con redes externas	TS 23.401 [14]
	Denominación	Descripción	
Entidades comunes a las redes 3GPP	HSS	Base de datos global del sistema (contiene, entre otros, los datos de suscripción de los usuarios).	TS 23.002 [1] TS 23.008 [16]
	PCRF	Elemento central del sistema de control de uso de la red (policy control) y control de tarificación.	TS 23.203 [27]
	OCS	Nodo de control para la provisión de servicios que requieren tarificación on-line	TS 23.203 [27] TS 32.240 [28]
	OFCS	Nodo de recogida de la información de tarificación para su posterior transferencia al sistema de facturación.	TS 23.203 [27] TS 32.240 [28]

Tabla 1.11: Entidades de red e interfaces de EPC ^[12]

	Denominación	Entidades de red asociadas	
Interfaces	S1-MME	MME E-UTRAN (eNB)	Documentos TS 36.41x
	S1-U	S-GW E-UTRAN (eNB)	TS 29.281 [26]
	SGi	P-GW Redes externas	TS 29.061 [17]
	S6e	MME HSS	TS 29.272 [25]
	S5/S8	P-GW S-GW	TS 29.274 [21] (opción GTP) TS 23.275 [24] (opción PMIPv6)
	S11	MME S-GW	TS 29.274 [21]
	S10	MME MME	TS 29.274 [21]
	Señalización NAS	UE MME	TS 24.301 [37] [37]
	Rx	PCRF Plataformas servicios	TS 29.214 [29]
	S9	PCRF PCRF	TS 29.215 [30]
	Gx/Gxc	P-GW/S-GW PCRF	TS 29.212 [31]
	Gz/Gy	P-GW OFCS/OCS	Documentos TS 32.2xx

(Continuación) Tabla 1.11: Entidades de red e interfaces de EPC

1.15. Red acceso LTE ^[15]

En el sistema LTE, la red de acceso se denomina E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Access Network*), la misma que se compone de un conjunto de nodos llamados *evolved NodeB* (eNB) donde se encuentran los equipos de control y la estación base.

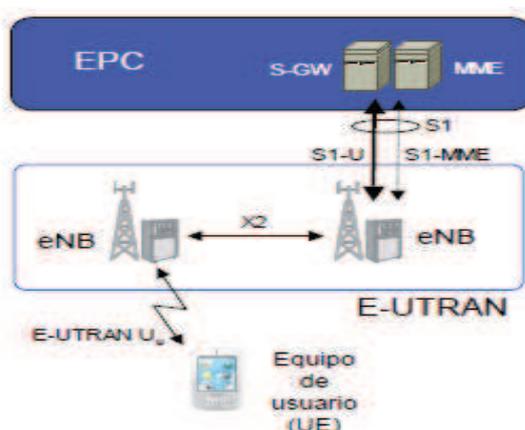


Figura 1.14: Red de acceso E-UTRAN. ^[12]

Como se puede observar en la Figura 1.14, la red de acceso E-UTRAN está compuesta por eNBs, cuya función es ser el lazo intermedio entre los equipos de usuario y el núcleo de la red.

1.15.1. Evolved NodeB (eNB) ^[15]

En LTE al conjunto de equipos de sus estaciones base y equipos de control se los conoce con el nombre de *Evolved NodeB* (eNB), son los responsables de todas las funciones para que un equipo final acceda a la red. Por intermedio de protocolos específicos de la interfaz radio, en la Figura 1.15 se ilustra los módulos que componen a (eNB).



Figura 1.15: Separación funcional entre el eNB, MME, SGW y PGW ^[12]

Entre las principales actividades que realizan los nodos eNBs se encuentran: ^[16]

- Servicio portador de radio (*Radio Bearer*, RB).- El nodo eNB realiza la transferencia de los paquetes IP a los equipos de usuario unidos con la información de señalización necesaria para controlar la operación de la interfaz radio. La información de señalización contiene el estado del equipo de usuario, servicios portadores activos, información de seguridad y la capacidad del terminal.
- Administración de recursos de radio.- es la principal función que realiza el eNB consiste en 3 operaciones básicas de administración para la adecuada utilización de los recursos de radio:

Control de admisión de los servicios portadores radio.

Control de movilidad, ayuda a realizar el handover.

Asignación dinámica de los recursos radio tanto en el enlace ascendente como descendente, se denominan funciones de scheduling.

- Selección dinámica del MME.- Otra función de los nodos eNBs es la selección dinámica de la adecuada del nodo MME, a la cual se conecta un terminal cuando se ha registrado en la red LTE. En E-UTRAN a diferencia de sus tecnologías antecesoras, la estación base eNB puede estar conectado simultáneamente a múltiples MMEs. El conjunto de MMEs a los que tiene acceso un terminal se denomina su Pool área.
- Seguridad.- Los datos para la comunicación entre el Equipo Final y el nodo eNB, son enviados en forma encriptada a través de la interfaz de radio.

1.16. Interfaces pertenecientes a la red de acceso del sistema LTE ^[12]

Las interfaces utilizadas en la red de acceso son descritas a continuación:

1.16.1. Interfaz de radio (Uu) ^[17]

La interfaz de radio denominada (Uu), permite la transferencia de información por el canal radio entre el eNB y los equipos de usuario. Esta interfaz utiliza tres mecanismos de transferencia como se muestra en la Figura 1.16.



Figura 1.16: Mecanismos de transferencia de información en la interfaz radio ^[17]

- ✓ Difusión de señalización de control: Utiliza un broadcast de señales de control en la zona de cobertura de una celda. Estas señales sirven para que los equipos finales puedan detectar el nodo eNB y saber los parámetros de configuración del mismo.
- ✓ Señalización de control dedicada: Se utiliza para la administración de los servicios ofrecidos por la operadora y para el registro del terminal en la red.
- ✓ Servicio Portador de Radio (*Radio Bearers*, RB): Esta interfaz permite la transferencia de paquetes IP a través del canal radio. La interfaz de Radio (Uu) solo deja pasar tráfico IP y no tramas de protocolos diferentes.

1.16.2. Interfaz (S1) ^[17]

Esta interfaz S1 permite la conexión de los nodos eNBs con el núcleo de la red. Esta conexión se realiza a través de la interfaz S1 dividida en 3 subinterfases para cumplir con funciones distintas, por lo que toman el nombre de S1-MME para conectar con el plano de control, S1-U se encarga de conectarse con el plano de usuario y S1-flex.

1.16.2.1. S1-U Plano de usuario ^[17]

El plano de usuario de la interfaz S1, se encarga del intercambio de datos del usuario entre los nodos eNB y S-GW sin garantizar la entrega de los paquetes, no realiza control de flujo, ni control de errores se basa en protocolos UDP.

1.16.2.2. S1-MME Plano de control ^[17]

S1-MME, es utilizado para realizar funciones de control entre eNBs y nodo MME, su principal función es controlar el establecimiento de los servicios portadores E-RAB: (E-UTRAN *Radio Access Bearer*), desde el cual se realizan los procedimientos para establecimiento, modificación y liberación de recursos para los servicios con el equipo final.

1.16.2.3. S1-flex^[17]

La interfaz S1 permite que un eNB pueda estar conectado simultáneamente a múltiples equipos del núcleo de la red sean estos múltiples MMEs y/o múltiples S-GWs a esta opción se la denomina S1-flex que ayuda a ciertas características del Sistema LTE como son:

Red robusta a fallos: Por estar conectados a diversos equipos a la vez existe redundancia en los nodos, lo que produce una robustez contra fallos.

Facilidad en interconexión con otras redes: Por medio de la interfaz S1-flex, un eNB puede conectarse con redes de diferentes proveedores con mayor facilidad.

1.16.3. Interfaz (X2) ^[17]

La interfaz X2 permite la conexión entre sí de los nodos eNBs. A través de esta interfaz los nodos eNBs se intercambian información de señalización, permitiendo un uso más eficiente de los recursos de radio para reducir al máximo las interferencias.

1.16.4. Resumen de los elementos que constituyen la red de acceso del sistema LTE

En la Tabla 1.12 se indica un resumen de los elementos que conforman la red de acceso del sistema LTE.

Entidades de red	Denominación	Descripción	Referencias 3GPP ¹⁾
	Evolved NodeB (eNB)	Estación base de la red de acceso E-UTRAN	TS 36.300 [4] TS 36.401 [5]
Interfaces	Denominación	Entidades de red asociadas	
	E-UTRAN Uu (también denominada LTE Uu o interfaz radio)	eNB UE	TS 36.300 [4] Documentos TS 36.2xx Y TS 36.3xx
	X2	eNB eNB	Documentos TS 36.42x TS 29.281 [26]
	S1-MME	eNB Red troncal EPC (MME)	Documentos TS 36.41x
	S1-U	eNB Red troncal EPC (S-GW)	TS 29.281 [26]

Tabla 1.12: Entidades de red e interfaces de E-UTRAN ^[12]

1.17. *Mobile Station (MS)* ^[12]

La estación móvil o equipo de usuario está compuesta como en las tecnologías antecesoras de dos elementos: una tarjeta que contiene un micro chip llamado (SIM/USIM/ISIM de acuerdo a la tecnología) y el equipo móvil (ME) *Mobile Equipment*. Cabe recalcar que el sistema LTE es compatible con los equipos de usuario de las tecnologías anteriores y mantiene los beneficios de la portabilidad de identificación al poder cambiar su tarjeta inteligente a otro dispositivo, sin perder su identificación en el Sistema.

A continuación, en la Figura 1.17, se presenta la estructura de la estación móvil o equipo de usuario.

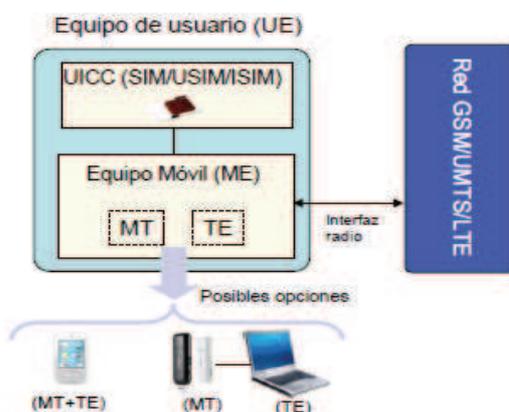


Figura 1.17: Equipo de usuario ^[12]

Descripción de componentes de equipo de usuario:

- ✓ UICC (*Universal Integrated Circuit Card*). - Es el nombre formal de las conocidas tarjetas de chip integrado para conexión a una red 3GPP. Como se puede ver en la Figura 1.17, el Sistema LTE se puede usar diferentes chips como son: tarjetas SIM (*Subscriber Identity Module*), tarjetas UMTS SIM (USIM) y las identificadas para tener la completa funcionalidad de LTE denominadas ISIM (IP Multimedia Services Identity Module), donde se almacenan los datos necesarios para la operación de los servicios de IMS.

- ✓ ME (Equipo Móvil). – Los equipos móviles contienen funciones propias de comunicación con la red celular así como las funciones adicionales que permiten la interacción del usuario con los servicios de la red. En el Sistema LTE existen dos clases de equipos móviles que son:

Terminal Móvil MT (*Mobile Terminal*): El cual tiene funciones básicas y su principal función es la conexión con la Red de acceso del Sistema LTE (*Modems LTE*).

Equipo Terminal TE (*Terminal Equipment*): Es el que permite la conexión con la Red de acceso y posee diversidad de aplicaciones adicionales no directamente relacionadas con el sistema de comunicaciones móviles.

Los equipos de usuario para el sistema LTE se clasifica en un conjunto de categorías definidas por 3GPP, de acuerdo al cumplimiento de los parámetros de conexión, estas categorías se las denomina formalmente como *UE-Category* las mismas que fueron descritas en los temarios anteriores de acuerdo al estándar de evolución del sistema LTE.

1.18. Protocolos de red LTE ^[18]

Después de conocer la arquitectura del sistema LTE, se detalla cómo es posible esa conexión entre capas del mismo nivel denominados protocolos, por ende se va a tener protocolos utilizados en la red de acceso y protocolos utilizados en el núcleo de la red.

1.18.1. Protocolos en la interfaz radio^[18]

Los protocolos de la interfaz radio determinan cómo se realiza la conexión para el envío de señalización y tráfico, entre los nodos eNBs y los equipos de usuario con los estándares establecidos en el sistema LTE, a través de la interfaz radio se conforma una pila de protocolos, los mismos que se encuentran asociados a diferentes capas, las cuales cumplen funciones y características específicas permitiendo la comunicación, para el mejor enfoque de lo expuesto se puede observar la Figura 1.18.

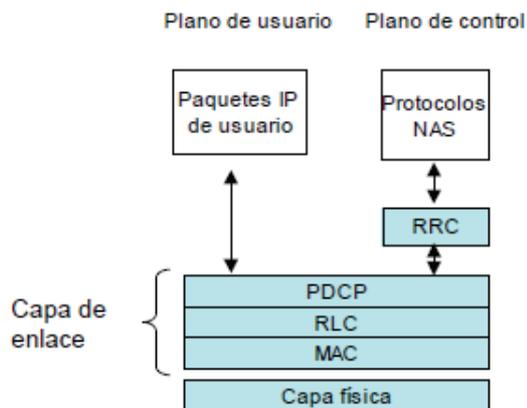


Figura 1.18: Protocolos de la interfaz radio de E-UTRAN [18]

1.18.2. Protocolos pertenecientes al plano de usuario^{[12] [18]}

Como se puede analizar en la Figura 1.18, la capa enlace para el sistema LTE está compuesto de 3 subcapas:

1.18.2.1. *Packet Data Convergence Protocol (PDCP)* ^{[12] [18]}

Es la subcapa encargada de entregar y recibir los paquetes IP de tráfico, proporciona el punto de acceso al servicio portador radio, como se lo muestra en la Figura 1.19.

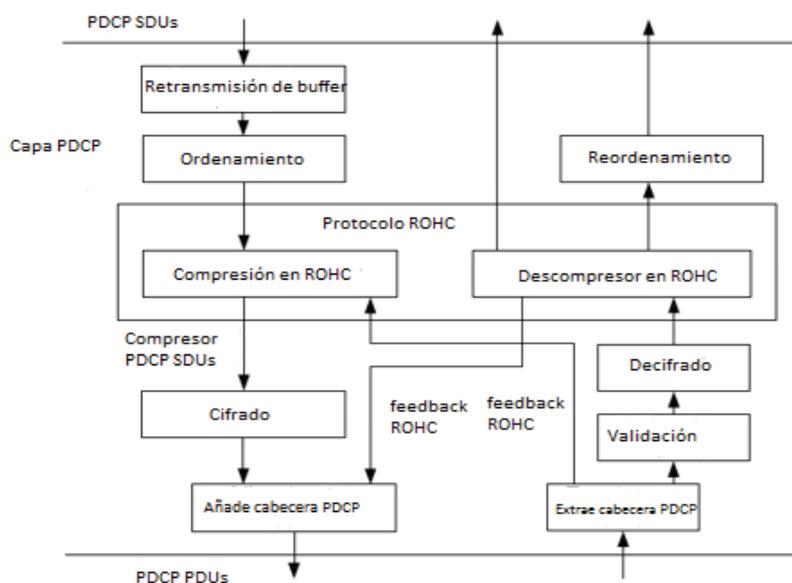


Figura 1.19: Vista de plano de usuario PDCP [18]

Las principales funciones de esta subcapa son:

- Compresión y descompresión de datos de cabecera mediante el protocolo ROHC (*Robust Header Compression*), se utiliza para reducir de cabecera de UDP/TCP-IP de su tamaño normal de 40 octetos a cabeceras pequeñas de 1 a 3 octetos.
- Transferencia de datos al usuario segura, proporciona mecanismos de protección e integridad a los mensajes de señalización generados por los protocolos de control RRC y NAS.
- Entrega en secuencia de las unidades de paquetes de datos, en la cabecera añadida por la capa PDCP contiene un número de secuencia que identifica al paquete IP enviado y permite realizar una entrega ordenada de los paquetes.
- Cifrado de los datos y de señalización utilizando 128 bits para garantizar su confidencialidad e integridad.
- Detección de paquetes duplicados en el handover, ayuda con la detección de posibles duplicados de los paquetes IP cuando se genera un proceso de handover.

1.18.2.2. *Radio Link Control (RLC)* ^[19]

La subcapa RLC permite enviar de forma confiable los paquetes PDCP entre el eNB y equipo de usuario, para esta transferencia de datos la RLC puede ser configurada de tres modos detallados a continuación:

1.18.2.2.1. Modo transparente (TM)

En este modo de operación de la subcapa RLC, no introduce ninguna cabecera, por ende tampoco realiza ninguna función de retransmisión o segmentación de paquetes, se limita a verificar el funcionamiento de los canales lógicos.

1.18.2.2.2. Modo sin confirmación (*Unacknowledged Mode, UM*)

En el modo sin confirmación la subcapa RLC, introduce una cabecera dando el nombre de los paquetes en esta subcapa de RLC_PDU, donde se verifica si los paquetes contienen errores, pero no se realizan mecanismos de retransmisión.

1.18.2.2.3. Modo de confirmación (*Acknowledged Mode, AM*)

El modo de confirmación es el más completo de la subcapa RLC, igual que en modo sin confirmación se introduce una cabecera y los paquetes también toman el nombre de RLC_PDU, pero además de la verificación de errores en los paquetes, se realiza retransmisión tipo ARQ, en este modo de operación funcionan los canales de tráfico y lógicos ligados a RLC, como se puede observar en la Figura 1.20.

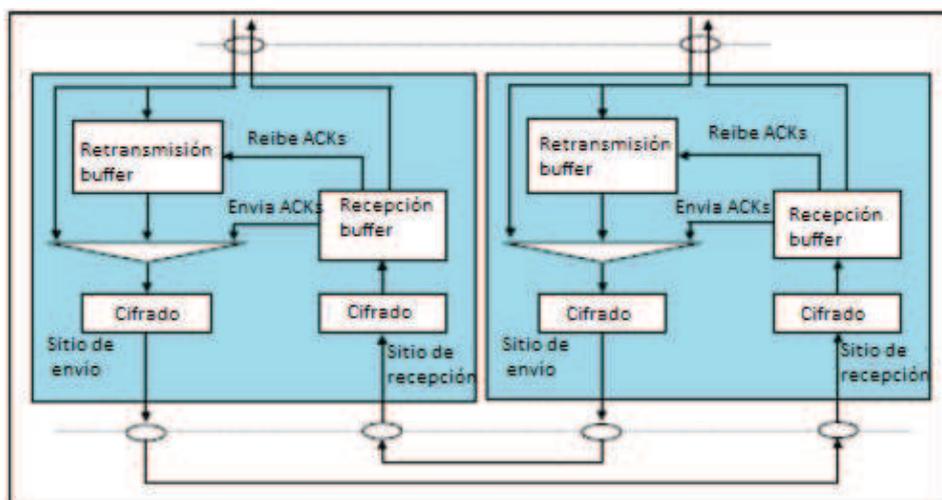


Figura 1.20: Modelo Capa RLC [19]

Las principales funciones de esta subcapa son:

Corrección de errores: Lo realiza solo cuando se lo configura en modo de confirmación mediante mecanismos *Automatic Repeat ReQuest* (ARQ).

Originalidad de paquetes: La subcapa RLC realiza la función de concatenar, segmentar y re-ensamblar los, para que la información llegue sin fallas, siempre que este configurado en modo de confirmación o no confirmación.

1.19. Canales asociados a la subcapa RLC ^[12]

Para el cumplimiento de las funciones dependiendo del modo que trabaje, la subcapa RLC se comunica a través de canales de diferente tipo:

Canales lógicos de control de la Subcapa RLC:

- **Canal de control de difusión o *broadcast control channel (BCCH)***: Este canal de control es utilizado solo para enlace descendente, cuando el nodo eNB transmite a los terminales de su área de cobertura información sobre el sistema.
- **Canal de control de búsqueda o *paging control channel (PCCH)***: Este canal es utilizado para avisar a un terminal de una llamada o de una sesión de datos, este canal lógico sólo existe en el enlace descendente.
- **Canal de control común o *common control channel (CCCH)***: Este canal permite establecer la comunicación entre el eNB y el terminal, enviando información de control.
- **Canal de control dedicado o *dedicated control channel (DCCH)***: Es un canal dedicado o también llamado punto a punto, su función es transferir información de control entre la red y un terminal cuando ya se estableció el enlace.
- **Canal de control de multidifusión o *multicast control channel (MCCH)***: Es un canal punto-multipunto sirve para transmitir información de control desde la red a un grupo de usuarios que requieren servicios multicast.

Canales lógicos de tráfico de la subcapa RLC:

- **Canal de tráfico dedicado o *DTCH (Dedicated Traffic Channel)***: Este canal es encargado de transferir información entre la red y un terminal.

Puede ser utilizado para transferir información así como señalización a nivel de aplicación.

- **Canal de tráfico multidifusión o MTCH (*Multicast Traffic Channel*):** Este canal es utilizado para transmitir información desde la red a un grupo de usuarios.

1.20. Control de Acceso al Medio o *Medium Access Control* (MAC) ^[20]

La subcapa MAC se encarga de controlar el acceso al canal de radio y realiza la conexión con la subcapa RLC, como se muestra en la Figura 1.21.

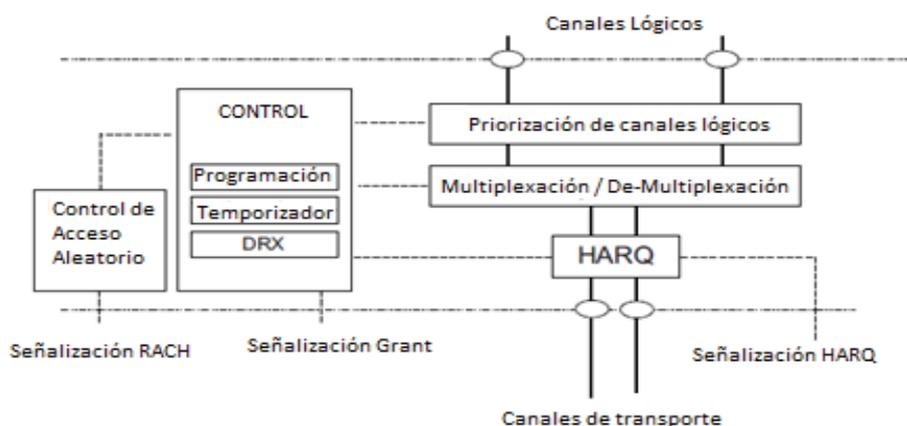


Figura 1.21: Arquitectura conceptual sobre UE en MAC ^[20]

Las funciones que cumple la subcapa MAC son: ^[20]

1.20.1. Programación dinámica o *scheduling dynamic*

La programación dinámica consiste en realizar una mejor distribución de los recursos entre canales de un mismo terminal y también entre canales de diferentes terminales, para atender prioridades.

1.20.2. Multiplexación de paquetes

Se encarga de la multiplexación y demultiplexación de los paquetes MAC asociados a diferentes canales lógicos a los que se denominan bloques de

transporte, para transmitir a los canales físicos, seleccionando la configuración determinada por el operador.

1.20.3. Control de errores

Una de las funciones más importantes de la subcapa MAC es el control de errores mediante técnicas ARQ o Hybrid ARQ (HARQ). El control de errores se realiza en los canales de transporte mediante la técnica HARQ, basada en el incremento de redundancia, corrigiendo errores introducidos por el canal si el desvanecimiento no es tan fuerte. Sin embargo si en recepción con esta redundancia no basta para corregir los errores se solicita la transmisión sólo de información no recibida anteriormente.

1.21. Canales asociados a la subcapa MAC ^[20]

Los canales ligados a la subcapa MAC se denominan canales de transporte y son utilizados para la transmisión de información a través de la interfaz aire, los canales de transporte se dividen downlink y uplink.

Canales de transporte en downlink:

- **Canal de difusión o *broadcast channel* (BCH):** Este canal es utilizado para el transporte de información del sistema.
- **Canal compartido en enlace descendente o *downlink shared channel* (DL-SCH):** Es un canal que transporta información y señalización. Permite retransmisión basadas en HARQ.
- **Canal de búsqueda o *paging channel* (PCH):** Este canal es utilizado para emitir una búsqueda en el área de cobertura de la celda.
- **Canal multidifusión o *multicast channel* (MCH):** Es el canal que permite el envío de información a múltiples usuarios en el área de cobertura de la celda.

Canales de transporte en uplink:

- **Canal compartido en enlace ascendente o *uplink shared channel* (UL-SCH):** En el canal de uplink, se permite transportar información y señalización. Soporta técnicas de retransmisión basados en HARQ y permite la asignación de recursos radio.
- **Canal de acceso aleatorio o *random access channel* (RACH):** Este canal se utiliza para enviar peticiones de acceso al sistema, así como para transmitir mensajes cortos de información de control.

1.22. Protocolos pertenecientes al plano de control ^[12]

1.22.1. Control de Recursos de Radio (RRC)

Este protocolo permite establecer una conexión de control entre el eNB y un equipo de usuario, donde se llevan a cabo un número importante de funciones relacionadas con la gestión operativa de la interfaz radio.

Las principales funciones del protocolo RRC son:

- Sistema de información: Proporciona a todos los terminales la difusión de la información común procedente de capas superiores, también brinda información cuando el terminal está en modo Idle.
- Control de conexión RRC: Permite controlar todos los procedimientos relacionados con el establecimiento, mantenimiento y cierre de una conexión.
- Control de movilidad: Gestiona los procedimientos de movilidad, seguridad y transferencia de la información por parte del terminal.

1.23. Protocolos NAS (*Non-Access Stratum*) ^[21]

Los protocolos NAS (*Non-Access Stratum*) son utilizados para establecer la conectividad entre el usuario y los nodos centrales de la red LTE, además fueron desarrollados por 3GPP, por lo que conserva bastante similitud con los protocolos NAS utilizados en tecnologías antecesoras.

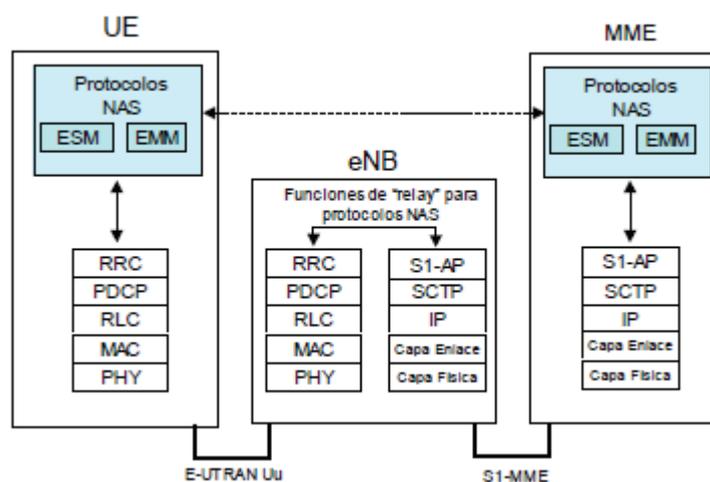


Figura 1.22: Protocolos NAS entre UE y MME ^[12]

Como podemos observar en la Figura 1.22 existen 2 categorías de protocolos *Non-Access Stratum* (NAS):

I. EPS *Mobility Management* (EMM): ^[21] ^[22]

El protocolo EMM, interviene en el control de la movilidad del equipo de usuario que utiliza la red de acceso E-UTRAN para conectarse con el núcleo de red. La principal función de NAS – EMM es realizar procedimientos de “registros” y “cancelación de registros” de los usuarios en la red LTE, procedimientos denominados como *Network Attach* y *Dettach*, además realiza la actualización del Área de seguimiento.

EMM también permite usar al equipo terminal para el envío de identificadores, como el IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*), el IMEI (*International Mobile Equipment Identity*), para poder comenzar el procedimiento de autenticación del usuario, dando el nivel de seguridad necesario al Sistema LTE.

II. Gestión de sesión EPS (ESM) ^[21] ^[22]

EL Protocolo NAS para la gestión de las sesiones ESM, ayuda al establecimiento y manejo de los datos del usuario. Entre los procedimientos que interviene el protocolo ESM se encuentra la activación, desactivación y modificación de los servicios portadores EPS o también llamados EPS Bearer. Estos procedimientos permiten que el equipo de usuario pueda notificar su necesidad de disponer de recursos que le permitan transferir datos con determinadas características de QoS.

1.24. IP *Multimedia Subsystem* (IMS) ^[23] ^[12]

IMS son las siglas del subsistema multimedia IP que en la red LTE es fundamental para brindar ciertos servicios como voz y video sobre IP. El IMS proporciona al sistema LTE, los elementos de control necesarios para poder soportar servicios de comunicación multimedia utilizando el protocolo IP. IMS es un subsistema que posee una infraestructura propia, la misma se encuentra compuesta por ciertos elementos de la red LTE y así poder establecer sus servicios.

IMS adopta protocolos de comunicación establecidos en IETF (*Internet Engineering Task Force*), que parten de una base tecnológica acentuada que permita seguir la continuidad de equipos ya establecidos en el mercado y dar realce a la tendencia de convergencia e unicidad con las redes 3GPP.

Todas las tecnologías 3GPP utilizan el protocolo SIP (*Session Initiation Protocol*) definido en la recomendación RFC3261 de IETF como protocolo primario para soportar la señalización asociada al subsistema IMS.

SIP es un protocolo que se creó para controlar el establecimiento y liberación de sesiones multimedia como telefonía, videoconferencia, sobre redes IP entre dos o más participantes. Pero por su flexibilidad y desarrollo permitieron que actualmente el protocolo tenga una gama de aplicaciones mucho más amplia y se lo utiliza en: mensajería instantánea, tele-presencia, juegos distribuidos, control remoto de dispositivos, etc.

El Subsistema Multimedia IP (IMS) se estructura de 3 capas detalladas en la Figura 1.23.

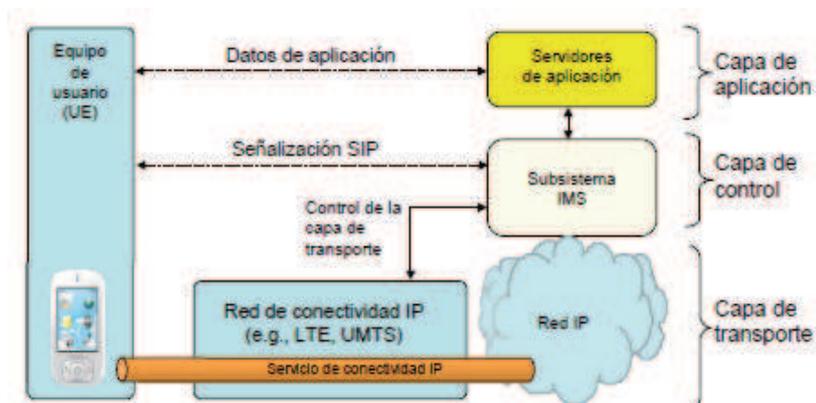


Figura 1.23: Modelo de provisión de servicios en base al subsistema IMS [23]

1. **Capa transporte:** Corresponde a la tecnología de acceso utilizada, para LTE la red de acceso se denomina E-UTRAN, proporciona el enrutamiento IP entre terminales y demás elementos de la red.
2. **Capa de control:** Son los elementos encargados de la gestión de sesiones con los servidores de señalización SIP, también controlan otros elementos para la interoperabilidad con redes móviles o fijas a través de la señalización.
3. **Capa de aplicación:** Se encuentra formada por los servidores de aplicación que contienen la lógica y datos asociados a los diferentes servicios proporcionados a través de IMS.

CAPÍTULO 2

CANAL INALÁMBRICO Y MODELO DE PROPAGACIÓN EN LTE

2.1. Introducción

Las comunicaciones móviles han sufrido un crecimiento exponencial en los últimos años debido al desarrollo tecnológico, donde la mayoría de los usuarios móviles han ido incrementando su interés por los beneficios que poseen al tener varias aplicaciones sean éstas de oficina, de entretenimiento, redes sociales y otras más unificadas en un solo dispositivo, pero a la par del desarrollo de los terminales se han generado técnicas que permiten superar las limitaciones de las comunicaciones inalámbricas por su propagación en la interfaz aire, donde se tienen varios obstáculos los mismos que se detallan en este capítulo, comprendiendo el proceso de comunicación inalámbrica. También se explican los modelos de propagación en especial el modelo de Okumura-Hata para entornos urbanos, suburbanos y rurales, tomando en cuenta la tecnología LTE (*Long Term Evolution*) que es el tema central de este proyecto, por otra parte se profundiza la estructura de la capa física del sistema LTE, dada que es la capa encargada de realizar la transmisión propiamente dicha a través del canal de radio y comprende las funciones de codificación, modulación y procesamiento de las señales por intermedio de diversas técnicas.

2.2. Canal inalámbrico ^[25]

El canal es un elemento de la comunicación, cuando las comunicaciones son inalámbricas existe un solo medio de transmisión que es el aire, en el cual se distribuye el espectro radioeléctrico, el mismo que está dividido en canales limitados en frecuencias de radio, es por este motivo que las comunicaciones inalámbricas son mucho más impredecibles que las comunicaciones alámbricas,

produciendo diversos aspectos u obstáculos que se deben tomar en cuenta para que la comunicación inalámbrica sea exitosa; en la Figura 2.1 se muestra un esquema de comunicaciones en el canal inalámbrico.

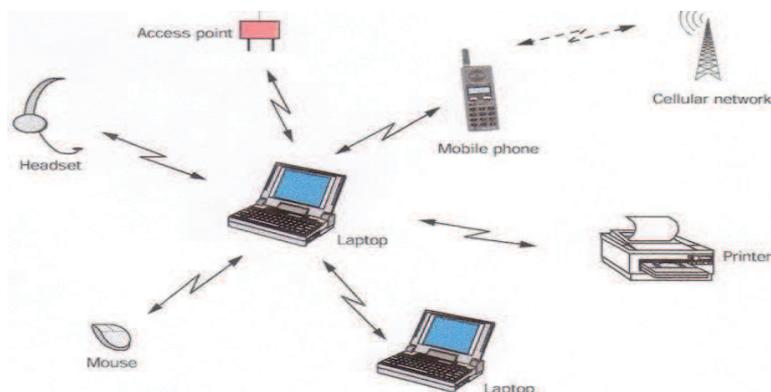


Figura 2.1: Canal inalámbrico [25]

2.3. Características del canal inalámbrico [26]

Aspectos a tomar en cuenta en el canal inalámbrico para una comunicación satisfactoria:

2.3.1. Interferencia

Una de las principales dificultades en un sistema inalámbrico es el efecto de interferencia cuya definición es la contaminación de la señal original por señales extrañas que hacen variar a dicha señal por ser transmitidas en frecuencias muy cercanas o igual a la original, lo que puede provocar hasta su inhibición por completo dando como resultado la cancelación total de la señal original.

Existe tres tipos básicos de interferencias: la interferencia de radio frecuencia (RFI), la interferencia eléctrica y la intermodulación:

- Interferencia de Radio Frecuencia (RFI) - Se produce cuándo un transmisor de radio, televisión, equipos de comunicaciones, u otros tipos de equipos emiten señales en un mismo rango de frecuencia, provocando que se interfieran unos a otros.

- La interferencia eléctrica.- Es provocada por el ruido emitido de los equipos por su consumo eléctrico, no es una interferencia intencional, pero puede causar la obstrucción de la transmisión en sistemas de comunicación.
- La intermodulación.- Es un tipo de interferencia causada por la combinación interna de señales, a diferencia de las otras interferencias ésta se produce en el mismo sistema de comunicaciones.

2.3.2. Atenuación ^[27]

Los sistemas inalámbricos como cualquier sistema de comunicación sufren atenuación de la señal transmitida, que conceptualmente es la pérdida de la potencia de una señal sufrida por transitar en cualquier medio de transmisión. Sin embargo, en comunicaciones inalámbricas como el medio de transmisión es el aire, la atenuación o factor de pérdida ($L(x)$) es la relación que existe entre la potencia de la señal transmitida (P_t) y a potencia de la señal recibida ($P_r(x)$).

$$L(x) = \frac{P_t}{P_r(x)}, \text{ o en dBs: } L^{dB}(x) = P_t^{dB} - P_r^{dB}(x)$$

Donde:

x : Distancia recorrida por la señal

P_t : Potencia transmitida

$P_r(x)$: Potencia recibida en función de la distancia

$L(x)$: Factor de pérdida

2.3.3. Atenuación en espacio libre ^[27]

También llamado modelo de propagación en espacio libre, representa el cociente entre la potencia transmitida y la potencia recibida con antenas isotrópicas. Para el mejor entendimiento primero se analiza la fórmula de la potencia de la señal recibida (P_r) que es:

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

Donde:

P_r : Potencia de la señal recibida

P_t : Potencia de la señal transmitida

λ : Longitud de onda

d : Distancia recorrida por la señal

Una vez ya analizada la fórmula de la potencia recibida se puede despejar el coeficiente de $\frac{P_t}{P_r}$ así obteniendo el factor de pérdida o atenuación en espacio libre (L_{bf}) con antenas isotrópicas obteniendo la siguiente expresión:

$$L_{bf} = \frac{P_t}{P_r} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

Si la atenuación de espacio libre se lo quiere obtener en decibelios, se utiliza la siguiente expresión:

$$L_{bf}(dB) = 32.45 + 20 \log d (km) + 20 \log f (MHz)$$

En caso más general que las antenas no sean isotrópicas la expresión de potencia recibida es:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

Donde:

P_r : Potencia de la señal recibida

P_t : Potencia de la señal transmitida

G_r : Ganancia de la antena en recepción

G_t : Ganancia de la antena de transmisión

λ : Longitud de onda

d : Distancia recorrida por la señal

Por ende la ecuación de atenuación (L_f) en general se define como:

$$L_f = \frac{P_t}{P_r} = L_{bf} - G_t - G_r \text{ (dB)}$$

2.3.4. Atenuación en general ^[27]

Se explicó en el literal anterior los casos de atenuación o factor de pérdida cuando se presentan condiciones de espacio libre, pero en la realidad no se dan esas condiciones; el caso más general se da cuando una antena emite potencia con una cierta ganancia en una distancia (d), de un campo eléctrico (E), el cual se debe tomar como referencia respecto al campo eléctrico cuando las condiciones son de espacio libre (E_0) siempre y cuando $E < E_0$, por ende se tiene la atenuación de campo eléctrico con la siguiente expresión:

$$A_E = 20 \log \frac{E_0}{E}$$

Por este motivo la ecuación más general de la potencia recibida es:

$$P_r = P_t \left(\frac{E}{E_0} \right)^2 G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

Donde:

P_r : Potencia de la señal recibida

P_t : Potencia de la señal transmitida

E : Campo eléctrico a una distancia (d)

E_0 : Campo eléctrico en espacio libre

G_r : Ganancia de la antena en recepción

G_t : Ganancia de la antena de transmisión

λ : Longitud de onda

d : Distancia recorrida por la señal

Tomando la definición de la atenuación para canales inalámbricos que es la relación de $\frac{P_t}{P_r}$ se obtiene la ecuación general de la atenuación o factor de pérdida, mientras que la misma ecuación en decibelios se define como:

$$L(dB) = A_E - (G_t + G_r) + L_{bf} = A_E + L_f$$

Donde:

$L(dB)$: Atenuación en general o factor de pérdida

$A_E(dB)$: Atenuación de campo eléctrico

$G_t(dB)$: Ganancia de la antena de transmisión

$G_r(dB)$: Ganancia de la antena en recepción

$L_{bf}(dB)$: Atenuación o factor de pérdida en espacio libre con antenas isotrópicas.

$L_f(dB)$: Atenuación o factor de pérdida en espacio libre con antenas cualesquiera.

2.4. Fading o desvanecimiento ^[28]

En sistemas inalámbricos, la señal viaja por una o varias trayectorias que tienen diversos factores como la atenuación, obstáculos, superficies de distintos materiales que provocan el debilitamiento llamado fading o desvanecimiento de dicha señal antes de llegar al receptor. Provocando consecuentemente la reducción en la intensidad de la señal que en algunas ocasiones, si el sistema inalámbrico no es muy robusto, puede provocar la cancelación total de la comunicación.

En concepto, el desvanecimiento se lo toma como una variación temporal de la amplitud, fase y polarización de la señal recibida con relación al valor nominal debido al trayecto de propagación. El desvanecimiento se puede ver afectado por condiciones climáticas y condiciones medioambientales que obstaculicen el trayecto de la señal hasta alcanzar su destino.

El fading o desvanecimiento se divide en dos grandes grupos para su estudio desvanecimiento a gran escala y desvanecimiento a pequeña escala; el grado o clase de desvanecimiento dependerá de la dispersión del retardo de las señales reflejadas y de sus fases, pues las señales que pasan por el canal de comunicaciones móviles varían en tiempo y frecuencia. Las causas que producen

el desvanecimiento pueden ser incontables pero en todos los casos producen el deterioro en más o menos proporción de la calidad del enlace inalámbrico.

2.4.1. Desvanecimiento a gran escala

El desvanecimiento a gran escala se refiere a la pérdida que experimenta la señal al propagarse por obstáculos naturales como lomas, montañas o por obstáculos artificiales como edificios o casas, dando un desvanecimiento en función de la distancia recorrida, siempre que la distancia sea mayor que la longitud de onda ($d \gg \lambda$). Típicamente para que exista desvanecimiento a gran escala la señal debe recorrer una distancia similar o mayor al tamaño de cobertura de una macro celda, por este motivo se dice que el desvanecimiento a gran escala es independiente de la frecuencia.

2.4.2. Desvanecimiento a pequeña escala

El desvanecimiento a pequeña escala se presenta debido al fenómeno de la interferencia constructiva o destructiva de la señal, esto se da por la variación de la frecuencia, provocando una rápida fluctuación de la amplitud y la fase de una señal en una distancia corta, mayor que la longitud de onda (λ), en el orden de los metros.

2.4.3. Desvanecimiento multitrayectoria

El desvanecimiento multitrayectoria también llamado dispersión de retardo multitrayectoria, es provocado por las múltiples trayectorias que tienen las diferentes señales para alcanzar su destino por medio del canal inalámbrico donde se presentan diversos fenómenos como la difracción o reflexión propios de cada elemento u objeto, provocando diferentes retardos en tiempo y atenuación en cada señal transmitida, esto provoca que el desvanecimiento multitrayectoria se divida en dos grandes grupos como son: la dispersión de tiempo y el efecto doppler descritos a continuación. ^{[2][28]}

2.4.4. Dispersión de tiempo (*delay spread*)

Dispersión de tiempo o *delay spread* se manifiesta como la distorsión que sufre la señal por diferentes retardos y atenuación propia del canal inalámbrico, dando lugar al ensanchamiento de los símbolos llamado interferencia inter-símbolo (ISI), para la interpretación de cuanto afecta el *delay spread* en el BER del canal se utiliza el denominado concepto de ancho de banda coherente.

2.4.4.1. Ancho de banda coherente

Es una gama de frecuencias sobre la cual la atenuación se mantiene constante, y se lo calcula con la siguiente expresión:

$$B_c \approx \frac{1}{2\pi\tau_d}$$

Donde:

B_c : Ancho de banda coherente

τ_d : Dispersión de tiempo (*delay spread*)

2.4.5. Desvanecimiento plano (*flat fading*)

El desvanecimiento plano o *flat fading* se manifiesta si el ancho de banda coherente (B_c), es mayor que el ancho de banda del canal (B_w) en formulación matemática, debe cumplir:

Si: $B_c > B_w$ se presenta FLAT FADING

Este suceso de desvanecimiento plano es el menos inofensivo para una buena comunicación.

2.4.6. Desvanecimiento selectivo (*selective fading*)

El desvanecimiento selectivo o *selective fading* se manifiesta si el ancho de banda coherente (B_c), es menor que el ancho de banda del canal (B_w) en formulación matemática, debe cumplir:

$$\text{Si: } B_c < B_w \quad \text{se presenta SELECTIVE FADING}$$

El desvanecimiento selectivo es un problema para un sistema inalámbrico y se produce porque las componentes de frecuencia arriban en diferentes tiempos con diferentes niveles de atenuación, provocando que la información llegue de manera incorrecta o se pierda.

2.4.7. Efecto Doppler (*Doppler spread*) ^{[2][28]}

El efecto doppler se presenta exclusivamente por la movilidad del usuario con su equipo terminal en comunicaciones inalámbricas, lo que representa un desplazamiento en las componentes de frecuencia de la señal, a la frecuencia desplazada se la conoce como frecuencia doppler y se la puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$f_m = \frac{v}{\lambda}$$

Donde:

f_m : Representa la frecuencia doppler

v : La velocidad que tiene el usuario de un terminal móvil

λ : Longitud de onda de la señal que interviene en el sistema inalámbrico.

En el efecto doppler se define un tiempo de coherencia (T_c) en el cual el comportamiento del canal es constante, este tiempo se lo puede obtener mediante otra expresión dada a continuación:

$$T_c \approx \frac{1}{2\pi f_m}$$

Donde:

T_c : Representa el tiempo coherente

f_m : Representa la frecuencia doppler

En una aproximación para la simplificación de la expresión anterior se tiene que:

$$T_c = \frac{0.423}{f_m}$$

Con la obtención del tiempo coherente y al compararlo con el tiempo de símbolo obtenido mediante el inverso de la velocidad de transmisión ($T_s = \frac{1}{V_{tx}}$) se producen dos desvanecimientos denominados fast fading y slow fading.

2.4.8. Desvanecimiento rápido (*fast fading*) ^{[2][28]}

Es un tipo de desvanecimiento producido cuando el tiempo de símbolo (T_s) supera al tiempo coherente (T_c); produciendo cambios en el canal, distorsionando por completo la información a ser transmitida, en términos matemáticos se produce cuando:

$$T_s \gg T_c \quad \text{se produce un FAST FADING}$$

El desvanecimiento rápido se produce por el efecto Doppler afectando en la amplitud y fase de la señal resultante.

2.4.9. Desvanecimiento lento (*slow fading*) ^{[2][28]}

Este desvanecimiento se da cuando el tiempo de símbolo (T_s) es menor que el tiempo coherente (T_c); es producido por las zonas de sombra o shadowing que obstaculizan la trayectoria de la señal, en términos matemáticos se produce cuando:

$$T_s \ll T_c \quad \text{se produce un SLOW FADING}$$

2.5. Modelamiento del canal inalámbrico ^[28]

En comunicaciones inalámbricas, el medio de transmisión es el aire y existen diversos factores que degradan la calidad de la comunicación, pero el principal factor se puede decir que es el desvanecimiento rápido o fast fading; es por este motivo y la naturaleza impredecible de las comunicaciones inalámbricas que se han desarrollado diferentes modelados del canal inalámbrico para predecir de cierta forma el comportamiento de las señales y asegurar su éxito en el traslado de información en un medio impredecible, a continuación se detallarán los principales modelos utilizados en el canal inalámbrico.

2.5.1. Modelo de desvanecimiento de Rayleigh ^[28]

El modelo de Rayleigh es uno de los modelos de desvanecimiento aplicado al canal inalámbrico para describir escenarios que no tienen un camino predominante o abierto es decir en sistemas NLOS (*Non Line of Sight*), representando el peor escenario, es utilizado en ambientes difíciles como ciudades metrópolis y áreas urbanas. El modelo de Rayleigh se fundamenta matemáticamente con la distribución Rayleigh, donde representa estadísticamente la naturaleza variable en el tiempo de la envolvente de una señal en un esquema de desvanecimiento plano.

La función de densidad de probabilidad de la distribución Rayleigh está dada por la siguiente expresión, cuya resultante se la puede observar en la Figura 2.2.

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right] & 0 \leq r \leq \infty \\ 0 & r < 0 \end{cases}$$

Donde:

r : Representa la envolvente de la señal recibida

$\frac{r^2}{2}$: Potencia instantánea

σ^2 : Potencia media de la señal

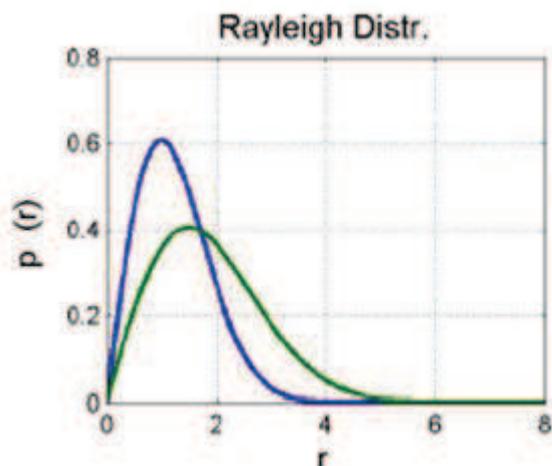


Figura 2.2: Distribución de Rayleigh [28]

2.5.2. Modelo de desvanecimiento de Rician [28]

El modelo de Rician, más conocido como desvanecimiento de Rice, es utilizado cuando las condiciones permiten que exista un trayecto predominante o LOS (*Line of Sight*); este modelo es utilizado en ambientes abiertos o en ambientes indoor, matemáticamente es representada por la distribución de Rice.

La función de densidad de probabilidad de la distribución Rice está dada por la siguiente expresión:

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right] I_0\left(\frac{A_r}{\sigma^2}\right) & A \geq 0, r \geq 0 \\ 0 & r < 0 \end{cases}$$

Donde:

r : Representa la envolvente de la señal recibida

$2\sigma^2$: Potencia media de la señal multitrayecto

A_r : Amplitud pico de la señal dominante

I_0 : Función de Bessel modificada de primera especie.

$\frac{r^2}{2}$: Potencia instantánea.

La distribución de Rice está descrita en términos del parámetro K , con la siguiente expresión, dando como resultado la Figura 2.3.

$$K = 10 \log \frac{A^2}{2\sigma^2} \text{ (dB)}$$

Donde:

K : Factor de Rice, define la tasa entre la potencia de la señal.

$2\sigma^2$: Potencia media de la señal multitrayecto

A : Amplitud pico de la señal dominante

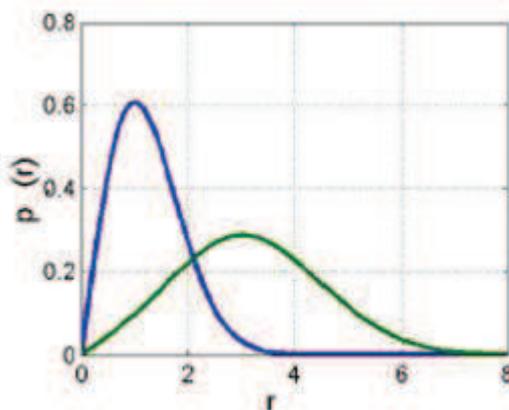


Figura 2.3: Distribución de Rice ^[28]

2.5.3. Modelo de shadowing ^[28]

Es un modelo tomado para describir efectos de sombra por obstáculos de gran tamaño como son edificios, árboles, casas, etc. El modelo de shadowing se fundamenta matemáticamente por la distribución lognormal.

La función de densidad de probabilidad de la distribución lognormal está dada por la siguiente expresión, dando como resultado una curva que se puede observar en la Figura 2.4.

$$p(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_s}} e^{-\left[\frac{(S-S_m)^2}{2\sigma_s^2}\right]}$$

Donde:

S_m : Valor medio de S en dBm .

σ_S : Desviación estándar de S en dB .

S : $10 \log s$ en dBm

s : Potencia de la señal en mW

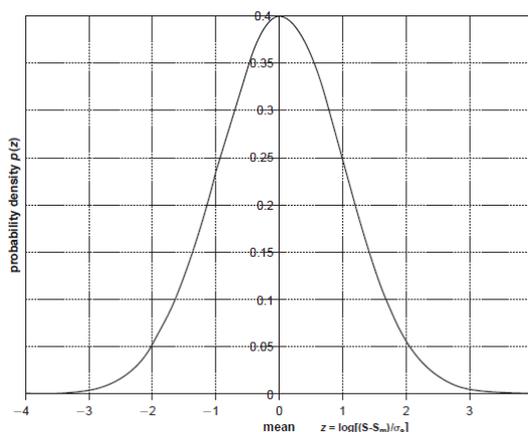


Figura 2.4: Distribución Log-normal [28]

2.6. Indicadores de desvanecimiento [29]

2.6.1. Cambio de cruce de nivel o *Level Crossing Rate* (LCR)

El *LCR* es un indicador que permite calcular cuantas veces la señal cruza por un nivel, para este indicador se utiliza la frecuencia Doppler, la formulación matemática es expresada de la siguiente manera:

$$LCR = \sqrt{2\pi} * f_m * \rho e^{-\rho^2} \text{ (Desvanecimientos/seg)}$$

Donde:

LCR: Se mide en (Desvanecimientos/seg)

f_m : Representa la frecuencia Doppler

ρ : Umbral normalizado del nivel de la señal, se lo calcula como:

$$\rho = \frac{R}{R_{rms}}$$

Donde:

R : Valor del nivel de amplitud

R_{rms} : Valor normalizado de la amplitud con el desvanecimiento

El umbral normalizado del nivel de la señal, en factores normales es cercano a 1.

2.6.2. Duración promedio del desvanecimiento ^[29]

Duración promedio del desvanecimiento (*average fade duration*) es un indicador que expresa el tiempo que se ve afectado el sistema de comunicación inalámbrico debido al desvanecimiento, se lo calcula con la siguiente expresión:

$$\text{Duración Promedio de Desvanecimiento} = \frac{e^{-\rho^2}}{\rho * f_m} * \frac{1}{\sqrt{2\pi}}$$

Donde:

f_m : Representa la frecuencia Doppler

ρ : Umbral normalizado del nivel de la señal

2.6.3. Zonas de Fresnel ^[30]

Las zonas de Fresnel representan regiones o áreas donde las señales secundarias recorren una distancia mayor que la trayectoria con línea de vista, éste factor se debe tomar en cuenta para comunicaciones inalámbricas, como se muestra en la Figura 2.5:

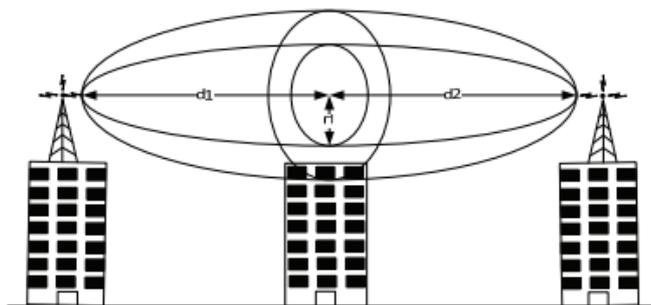


Figura 2.5: Zona de Fresnel [30]

Se denominan zonas de Fresnel por tener más de una capa separada de la línea de vista, por ende cada trayectoria tomada por las diferentes zonas de Fresnel aportan positiva o negativamente para el desfase de las señales, en los sistemas de comunicaciones celulares y comunicaciones inalámbricas, en general, las zonas de Fresnel consideran un factor K (para representar la curvatura de la tierra), por este motivo se considera que para la primera zona de Fresnel tomando un factor $K=4/3$ de curvatura no debe tener obstrucciones de línea de vista es decir que debe pasar el 100% de la señal, en cuanto si se toma un factor $K=2/3$ para la misma primera zona se debe prever una obstrucción máxima permisible del 40%.

La fórmula general para el cálculo de las zonas de Fresnel es:

$$r_n = 547.723 \sqrt{\frac{n d_1 d_2}{f d}}$$

Donde:

r_n : Radio de enésima zona de Fresnel

($n = 1,2,3 \dots$): Define el número de la zona de Fresnel

d_1 : Distancia desde el transmisor al objeto en Km.

d_2 : Distancia desde el objeto al receptor en Km.

d : Distancia total del enlace $d = d_1 + d_2$

f : Frecuencia en MHz.

2.7. Modelos de propagación ^[31]

Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características de un sistema inalámbrico en su medio de propagación, estos modelos desempeñan un papel fundamental en el diseño de sistemas celulares para predecir comportamientos de diversos aspectos como son: potencia de transmisión, la frecuencia de utilización, altura de las antenas, entre otros.

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

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 puede tener entre una estación base y un receptor móvil. 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.

En la Figura 2.6 se muestra un esquema de modelos de propagación.

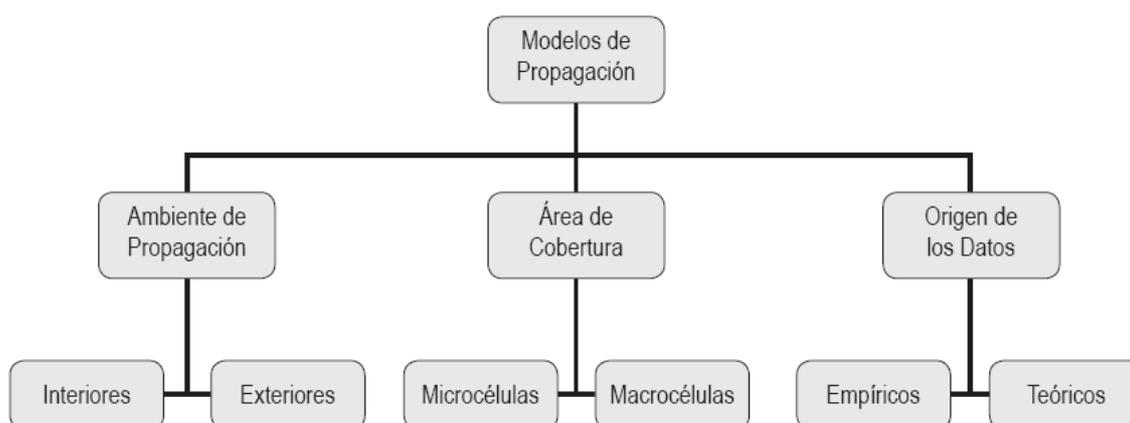


Figura 2.6: Clasificación de los modelos de propagación ^[31]

Los modelos de propagación han ido evolucionando de acuerdo al desarrollo de los sistemas celulares, hoy en día no solo se encuentran macro-celdas y micro-celdas sino que por la necesidad de cobertura y densidad poblacional se han desarrollado pico-celdas hasta llegar a las femto-celdas, es por este motivo, un mismo modelo de propagación se puede clasificar por diversos criterios de utilización.

En la actualidad existen un gran número de modelos de propagación empíricos y teóricos que se han desarrollado y se continuarán modificando de acuerdo a las necesidades de cada área en donde se va a utilizar, entre los principales modelos de propagación utilizados en la actualidad se tienen:

- Modelo Okumura-Hata
- Modelo Cost 231 Walfish-Ikegami
- Modelo Cost 207 GSM
- Modelos de ITU-R
- Modelo de Canal Espacial 3GPP
- Modelo de Canal UIT-*Advanced*

En este proyecto se ha determinado desarrollar una simulación con el Modelo de propagación Okumura-Hata con sus 3 ambientes de utilización para frecuencias de LTE, por este motivo se va a desarrollar a continuación la teoría de dicho modelo.

2.7.1. Modelo de propagación Okumura- Hata ^[31]

Okumura – Hata es el nombre de uno de los modelos de propagación más promulgados y utilizados con algunas variantes en su estructura. Este modelo está considerado entre los más simples y mejores en términos de su precisión en el cálculo de las pérdidas en el trayecto, por lo que ha sido utilizado como planificación de sistemas móviles en Japón y algunas metrópolis desarrolladas. Pero como todos los modelos de propagación, no son estáticos y pueden ser mejorados para brindar una mayor precisión. El principal resultado que proporciona el modelo es el valor medido de la pérdida básica de propagación, en

función de la frecuencia, la distancia, y las alturas de las antenas de la estación base y el móvil.

En la Figura 2.7 se muestra una ilustración de modelo de propagación Okumura-Hata.

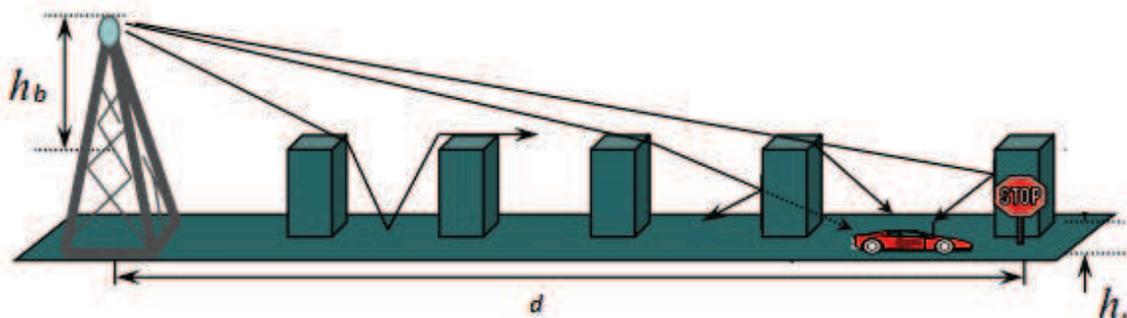


Figura 2.7: Modelo de propagación Okumura-Hata ^[31]

El modelo de propagación de Okumura-Hata es un modelo usado para planificación de redes de macro celdas; este modelo toma en cuenta el porcentaje de edificios en el trayecto que recorre la señal para el cálculo de la atenuación, es válido para el rango de frecuencias entre 150MHz a 1920MHz, sin embargo, puede ser extrapolado para frecuencias que lleguen a los 3000MHz, en un rango de predicción de cobertura de 1Km a 20Km. ^[31]

El modelo de propagación Okumura-Hata toma en cuenta varios aspectos para su propagación como son:

- Altura de las antenas
- Frecuencia de la portadora
- Espacios de propagación cuasi-abierto, espacios abiertos o áreas de terreno montañoso
- La pérdida por difracción debido a las montañas
- Zonas marítimas o lagos
- Pendientes en las carreteras

Tomando en cuenta todos estos aspectos, el Modelo Okumura-Hata se clasifica en 3 ambientes de propagación.

Área urbana: Corresponde a las grandes ciudades con altas edificaciones y casas con 2 o más pisos, o donde existen una gran concentración de casas o edificios.

$$L_{50}(\text{urbano}) = 69.55 + 26.16 \log f_c + (44.9 - 6.55 \log h_b) \log d \\ - 13.82 \log h_b - a(h_m) \quad (\text{dB})$$

Donde:

f_c : Frecuencia de la portadora en (MHz).

d : Distancia entre la estación Base y el terminal móvil.

h_b : Altura de la antena de la estación base en (m).

h_m : Altura de la antena de la estación móvil en (m).

$a(h_m)$: Factor de corrección para la altura de las antenas expresado para:

➤ Grandes ciudades:

$$a(h_m) = 8.29[\log(1.54 h_m)]^2 - 11 \quad f_c \leq 200\text{MHz}$$

$$a(h_m) = 3.2[\log(11.75 h_m)]^2 - 4.97 \quad f_c \geq 400\text{MHz}$$

Donde:

h_m : Altura de la antena de la estación móvil en (m).

➤ Pequeñas y medianas ciudades:

$$a(h_m) = [1.1 \log(f_c) - 0.7]h_m - [1.56 \log(f_c) - 0.8]$$

Donde:

f_c : Frecuencia de la portadora en (MHz).

h_m : Altura de la antena de la estación móvil en (m).

Área suburbana: Ciudades o carreteras en donde hay árboles y casas en forma dispersa. [31]

$$L_{50} = L_{50}(\text{urbano}) - 2 \left[\left(\log \left(\frac{f_c}{28} \right)^2 \right) - 5.4 \right] dB$$

Donde:

f_c : Frecuencia de la portadora en (MHz).

$L_{50}(\text{urbano})$: Modelo de propagación Okumura-Hata de área urbana

Área abierta: Son los espacios abiertos sin grandes árboles o edificaciones en el camino de la señal. [31]

$$L_{50} = L_{50}(\text{urbano}) - 4.78(\log f_c)^2 + 18.33 \log f_c - 40.94 \text{ dB}$$

Donde:

f_c : Frecuencia de la portadora en (MHz).

$L_{50}(\text{urbano})$: Modelo de propagación Okumura-Hata de área urbana

En resumen, los modelos de Okumura –Hata son válidos en los 3 ambientes para los siguientes parámetros:

$$150 \leq f_c \leq 2200 \text{ MHz}$$

$$30 \leq h_b \leq 200 \text{ m}$$

$$1 \leq h_m \leq 10 \text{ m}$$

$$1 \leq d \leq 20 \text{ Km}$$

2.8. Factores a tomar en cuenta en el enlace inalámbrico ^[32]

2.8.1. Margen de desvanecimiento (*fading margin*)

En cualquier tipo de comunicación inalámbrica, a larga distancia se propagan señales electromagnéticas por la atmosfera terrestre, las mismas que van a sufrir pérdidas en su potencia por factores externos ambientales. Es por esto que una señal nunca llega igual a como se la envió, por eso es necesario establecer un margen de desvanecimiento que permita tomar en cuenta a los factores ambientales y factores de propagación de la señal, así permitiendo obtener una relación con la confiabilidad del enlace para este objetivo se utiliza la ecuación de Barnett-Vignant la que describe la forma de calcular el tiempo de interrupción debido al desvanecimiento en una trayectoria sin diversidad, en función del terreno, el clima, la longitud de la trayectoria y el margen de desvanecimiento.

Al simplificar la ecuación de Barnett-Vignant se obtiene la expresión:

$$FM = 30 \log d + 10 \log(6 * ABf) - 10 \log(1 - R) - 70$$

Donde:

FM : Representa margen de desvanecimiento.

d : Distancia del enlace en (Km)

f : Frecuencia de portadora en (GHz)

$(1 - R)$: Objetivo de confiabilidad calculado con la siguiente formula $\left(\frac{0.00001 \times d}{400}\right)$

A : Factor de rugosidad (dependiente del terreno), especificado en la Tabla 2.1.

A	Factor de Rugosidad
4	Terreno Plano o con Agua
3	Sembríos densos o Pastizales
2	Bosques
1	Terreno Promedio
0.25	Terreno Rugoso

Tabla 2.1: Factor de Rugosidad ^[31]

B : Factor Climático, se detallada en la Tabla 2.2.

B	Factor Climático
1	Terreno Plano o con Agua
0.5	Sembríos densos o Pastizales
0.25	Bosques
0.125	Terreno Rugoso

Tabla 2.2 Factor Climático ^[31]

Después de haber obtenido el margen de desvanecimiento, se puede tener la potencia recibida y el margen de confiabilidad con la siguiente expresión:

$$Pr' = Pr - FM$$

Donde:

Pr' : Potencia recibida con margen de confiabilidad

Pr : Potencia recibida sin margen de desvanecimiento

FM : Margen de Desvanecimiento

2.8.2. Margen del enlace (*link margin*) ^[32]

Margen del enlace se define como la relación existente entre todas las ganancias y los factores de pérdidas que afectan al enlace para estimar un margen de rendimiento global. El margen del enlace se define por la siguiente expresión:

$$M = \frac{P_t G_t G_r A_g}{N_{f,total} T_k L_p L_f L_0 F_{margin} R \left(\frac{Eb}{N_0} \right)_{reqd}}$$

Donde:

M : Se define como margen del enlace

P_t : Potencia de transmisión

G_t : Ganancia de la antena de transmisión

G_r : Ganancia de la antena de recepción

A_g : Ganancia del amplificador en recepción

T_k : Temperatura de ruido en kelvin

L_p : Pérdida por trayectoria en (dB)

L_f : Pérdida de las antenas en (dB)

L_0 : Otras pérdidas en (dB)

F_{margin} : Representa margen de desvanecimiento en (dB).

R : Velocidad de transmisión en (dB).

$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{reqd}$: Relación energía de bit /densidad espectral de potencia de ruido en (dB).

$N_{f,total}$: Representa la figura de ruido, calculada de la siguiente manera:

$$N_{f,total} = SNR_{IN} - SNR_{OUT} \text{ (dB)}$$

Donde:

SNR_{IN} : Relación de la señal a ruido en la entrada del sistema en dBs

SNR_{OUT} : Relación de la señal a ruido en la salida del sistema en dBs

2.9. Compensación de los efectos del canal ^[33]

Como se indicó en los temas anteriores, hay varios aspectos, fenómenos naturales y provocados que degradan la calidad de la señal, pese a esto se toma en cuenta los mejores medios y métodos para que la señal llegue al receptor, sin embargo, en todos los casos de sistemas celulares se buscan maneras de ayudar a regenerar la señal que es recibida en la antena receptora a estos tratamientos de mejora se los conoce como métodos compensación de los efectos del canal.

Los principales métodos de compensación del canal se dividen en dos grandes grupos que son ecualización y diversidad, los mismos que pueden ser usados en forma independiente o en forma escalonada para obtener mejores resultados.

2.9.1. Ecualización ^[33]

La ecualización es un mecanismo de compensación de los efectos del canal, su principal función es reducir o compensar el ISI (Interferencia Inter-símbolo), originado por las múltiples trayectorias que toman las señales para llegar al receptor, como se muestra en la Figura 2.8.

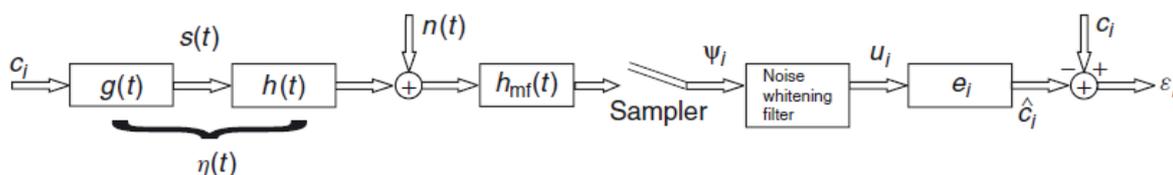


Figura 2.8: Modelo de Ecualizador ^[32]

Los ecualizadores son estructuras receptoras que trabajan en la reducción o eliminación del ISI, y al mismo tiempo mejoran el retardo inherente en el canal.

2.9.2. Diversidad ^[33]

La diversidad es una técnica utilizada para contrarrestar los efectos del canal causados sobre la señal, ayuda en la compensación del canal, causada por efectos del desvanecimiento y se relaciona con la implementación de redundancia en antenas para su mejor recepción. Existen varios tipos de diversidad analizados a continuación:

2.9.2.1. Diversidad de espacio ^[33]

Diversidad espacial, es el mecanismo que se manifiesta con el aumento de antenas para recepción, separadas una corta distancia (d) la cual varía de acuerdo a la altura de las antenas, cabe señalar que entre mayor es la frecuencia

de transmisión la distancia de separación de las antenas se reduce, es uno de los primeros sistemas MIMO, como se muestra en la Figura 2.9.

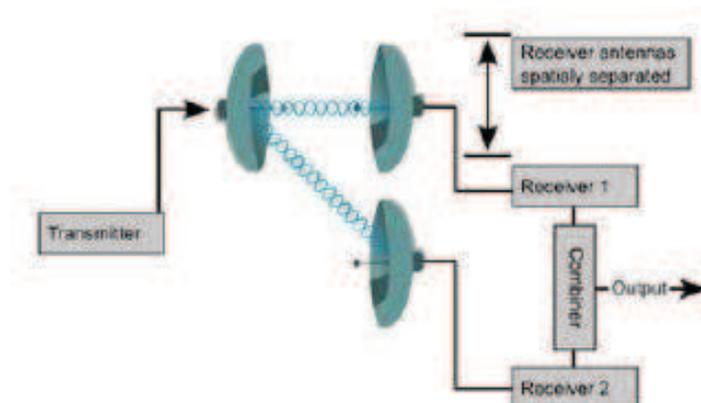


Figura 2.9: Diversidad Espacial [33]

2.9.2.2. Diversidad de tiempo [33]

Diversidad de tiempo consiste en transmitir la misma señal en diferentes slots de tiempo, siempre que la diferencia de tiempos entre los slots sea mayor que el tiempo coherente del canal, este tipo de diversidad se pone en práctica cuando existen sistemas de codificación.

2.9.2.3. Diversidad de frecuencia [33]

Diversidad de frecuencia se manifiesta cuando la misma señal se transmite en dos frecuencias diferentes, las frecuencias se encuentran separadas entre sí por un valor superior al ancho de banda coherente, utilizando esta técnica de diversidad se garantiza disminuir la posibilidad de desvanecimiento de la señal transmitida.

2.9.2.4. Diversidad angular

La diversidad angular se utiliza, por lo general, en combinación con la diversidad espacial, para mejorar la relación de las señales de las antenas muy juntas. Es recomendable utilizar este tipo de diversidad cuando la frecuencia de operación

supera los 10GHz, así pueden trabajar dos o más antenas recibiendo la misma señal por trayectos distintos con mayor campo de cobertura, como se indica en la Figura 2.10.

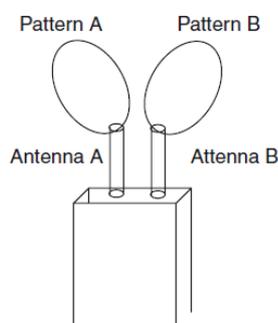


Figura 2.10: Diversidad angular de antenas con poca separación [33]

2.9.2.5. Diversidad de polarización

Diversidad de polarización, manifiesta que dos antenas pueden ser de transmisión o recepción, polarizadas horizontal y verticalmente para proveer dos señales desvanecidas no correlacionadas. En este tipo de diversidad no se toma en cuenta la separación de las antenas pero se reduce la potencia de transmisión en 3dB por dividir la potencia de la señal en dos antenas diferentes.

2.10. Técnicas avanzadas de acceso para LTE [34]

Las técnicas de acceso utilizadas para la tecnología LTE se dividen en dos: enlace descendente o downlink utiliza OFDMA y enlace ascendente o uplink utiliza la técnica de SC-FDMA. Para sustentar estas técnicas avanzadas de acceso se explica primero los fundamentos de OFDM pues a partir de esta técnica, se desarrollan otras tecnologías que permiten a LTE mayores niveles de capacidad y eficiencia.

2.10.1. Multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM)

OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) es una técnica de transmisión multiportadora que se fundamenta en multiplexar un conjunto de señales sobre múltiples subportadoras en diferentes frecuencias. El principal

concepto para utilizar esta técnica de acceso, es su ortogonalidad (perpendicularidad entre dos señales), que posibilita la transmisión simultánea de todos los bits, manteniendo la separación de los mismos haciendo posible su recuperación en recepción; esta técnica se ilustra en la Figura 2.11.

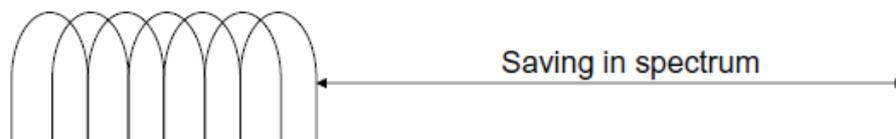


Figura 2.11: Eficiencia espectral de OFDM [34]

OFDM es utilizada por sistemas tales como la televisión digital terrestre (DVB-T), redes inalámbricas de área local (LAN) según los estándares IEEE 802.11a/g, WIMAX para los estándares IEEE 802.16 a/d.

La técnica OFDM tiene la particularidad que todas las subportadoras son empleadas para un solo usuario o fuente de datos.

Para enviar las señales al canal de cada una de las subportadoras deben pasar por un proceso de multiplexación de OFDM el cual consiste en tener un convertidor serie/paralelo con el fin de dividir la velocidad con la cual viaja la señal, suponiendo para un ejemplo la señal (R) en [bps] y un número (N) de subportadoras existentes, dan como resultado que cada subportadora tenga una velocidad de R/N en [bps] y por ende un tiempo de bit de N/R , en un ancho de banda dado por $N\Delta f$ centrado en f_c , como se lo especifica en la Figura 2.12.

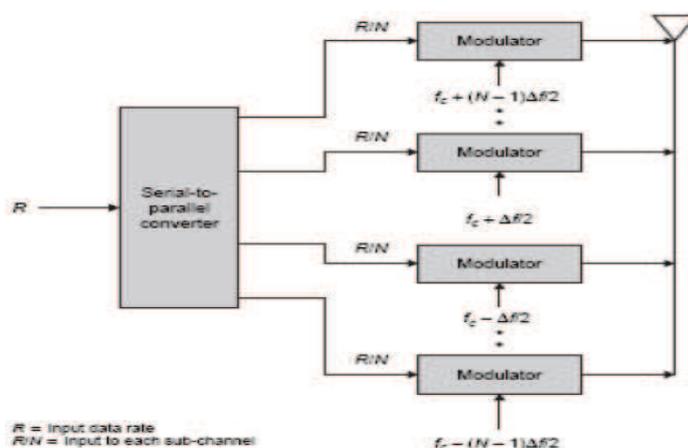


Figura 2.12: Esquema de OFDM [34]

Después de haber analizado el funcionamiento de OFDM a continuación se indica las técnicas de acceso usadas por LTE para sus enlaces:

2.10.2. OFDMA como técnica de acceso para el enlace descendente de LTE ^[12]

OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access*) es utilizada en LTE para su enlace descendente o downlink, su principal distinción con OFDM es que posibilita tener varias transmisiones simultáneas correspondientes a diferentes fuentes de información, como se puede observar en la Figura 2.13.

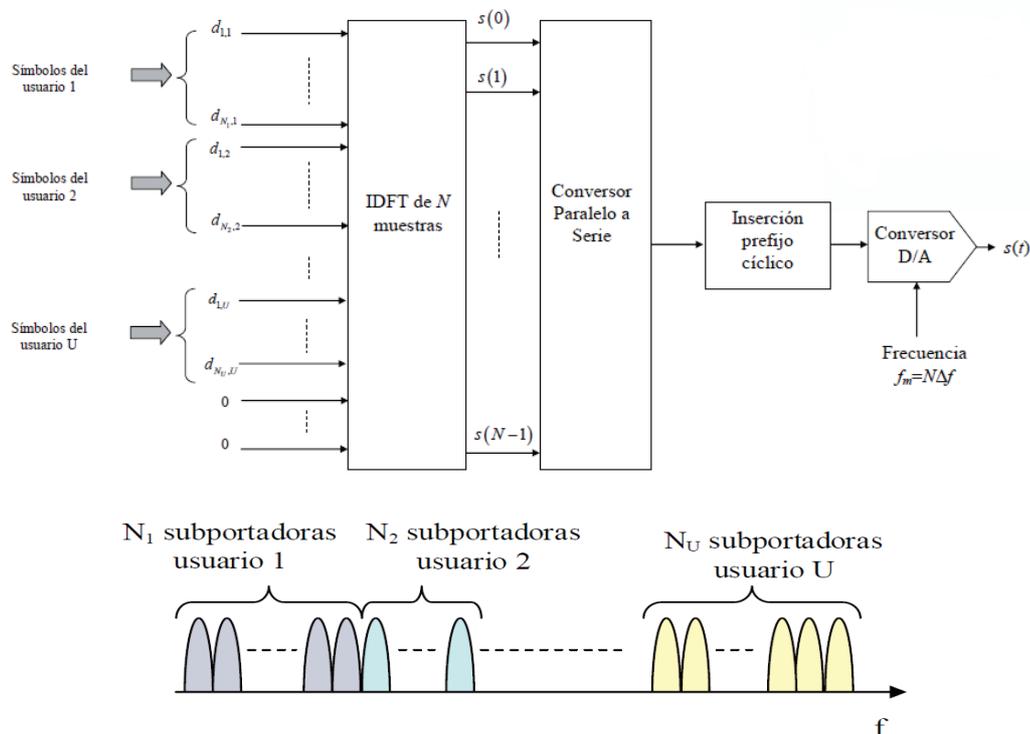


Figura 2.13: Multiplexación de usuarios en OFDMA - LTE ^[34]

Como se puede ver en la Figura 2.13, los usuarios utilizan un grupo de subportadoras contiguas, esto no siempre va hacer así, también se pueden distribuir los grupos de subportadoras no contiguas para un mismo usuario.

La técnica OFDMA está basada en la cantidad variable de subportadoras según el ancho de banda del canal. Un grupo de portadoras forman subcanales. Existen tres tipos de subportadoras o subcarriers:

- Subportadoras Piloto: Son las subportadoras encargadas de la sincronización y control.
- Subportadoras de Datos: Son las subportadoras que portan la información.
- Subportadoras Nulas: Son las subportadoras que proporcionan las bandas de guarda entre subcanales.

OFDMA para LTE presenta las siguientes ventajas: ^[12]

Robustez a la propagación multitrayectoria: La técnica OFDMA es bastante robusta frente a la interferencia intersímbolo, por el ensanchamiento de los pulsos provocados por la propagación multitrayectoria donde las señales llegan al receptor en diferentes tiempos, generalmente se la controla con ecualizadores, los mismos que son necesarios en el Sistema LTE por la implementación de anchos de banda variables de 5 MHz a 20 MHz.

Flexibilidad de bandas: En OFDMA se puede asignar más o menos subportadoras para un abonado dependiendo del requerimiento del servicio dando como consecuencia diferentes velocidades de transmisión a los diferentes usuarios en función de los requerimientos admitidos.

Granularidad mejorada: Para el sistema LTE, la granularidad se ve mejorada significativamente utilizando OFDMA, pues al subdividir la banda total en un conjunto elevado de subportadoras de banda estrecha que se asignan dinámicamente ayuda a la hora de asignar más o menos recursos a cada uno de los usuarios dependiendo de los servicios con diferentes requerimientos de calidad.

2.10.2.1. Parámetros de OFDMA utilizados en LTE ^[6]

LTE define una separación entre subportadoras de $\Delta f = 15$ kHz, espaciado por un CP (Prefijo Cíclico) de aproximadamente $5\mu s$, con un tiempo de símbolo definido por $TS = 1/\Delta f$, donde $TS = 1/15\text{kHz} = 66.67\mu s$. También permite una variabilidad en la separación con el fin de garantizar la conexión con diferentes tipos de celdas como se lo observa en la Figura 2.14.

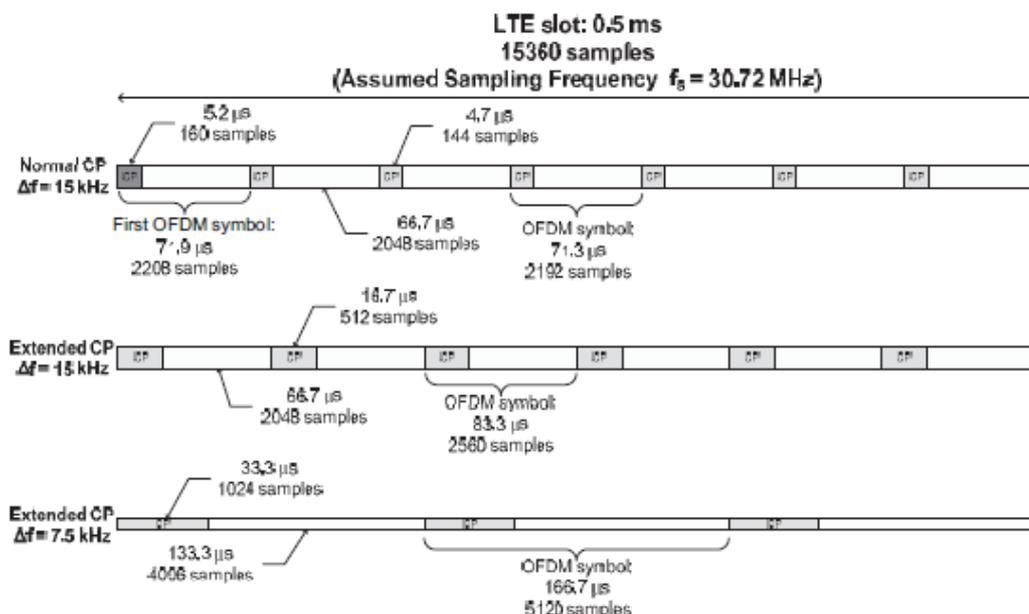


Figura 2.14: Parámetros de OFDMA en LTE [6]

Las subportadoras se agrupan en bloques de 12, con un ancho de banda total de $12 \cdot \Delta f = 180$ kHz. En consecuencia el número total de subportadoras ocupadas por una portadora LTE en el enlace descendente es de:

$$NS = 12 \cdot NB + 1$$

Donde:

NS: Número de Subportadoras.

NB: Número de Bloques definido como un conjunto de 12 subportadoras puede tomar valores entre $\{6, 15, 25, 50, 75, 100\}$.

2.10.3. SC-FDMA como técnica de acceso para el enlace ascendente de LTE [6]

SC-FDMA (*Single Carrier - Frequency Division Multiplexing Access*) es utilizada en LTE para su enlace ascendente o uplink, se optó por esta técnica de acceso debido a sus variaciones pequeñas de potencia en señal transmitida, PAPR (*Peak-to-Average-Power Ratio*) produciendo mayor eficiencia de los

amplificadores de potencia en comparación con OFDMA donde el efecto de tener más portadoras necesitaran más potencia haciendo menos eficiente al sistema.

Para esquematizar el proceso de SC-FDMA se puede observar en la Figura 2.15.

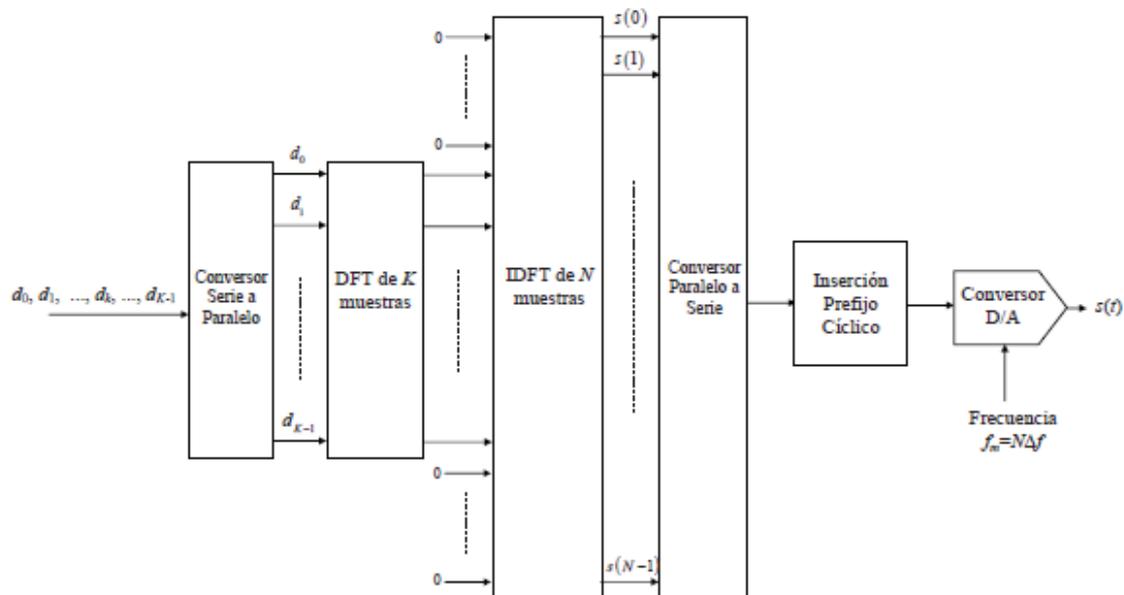


Figura 2.15: Esquema de transmisión de la señal SC-FDMA [6]

En la Figura 2.15, se representa un esquema de transmisión para SC-FDMA, donde se compone de K símbolos a transmitir, los mismos pasan por una precodificación mediante una transformada discreta de Fourier (DFT), antes de la transmisión OFDM de acuerdo con una transformada discreta inversa de Fourier (IDFT) de N muestras, con una separación entre subportadoras Δf después se introduce el prefijo cíclico, para luego pasar por un convertor y enviar la señal. SC-FDMA evita interferencias dentro de la celda por poseer diversidad de frecuencia.

2.10.3.1. Parámetros de SC-FDMA utilizados en LTE [6]

SC-FDMA presenta bastante similitud con OFDMA. Posee una separación entre subportadoras de $\Delta f = 15$ KHz, agrupadas en bloques de 12 subportadoras. Sus bloques de subportadoras se pueden asignar de forma flexible a los diferentes usuarios, con la diferencia que en SC-FDMA, todas las subportadoras asignadas a un usuario deben ser contiguas. Los parámetros de periodo de símbolo y

duración del CP son los mismos que en OFDMA como se los puede resumir en la Tabla 2.3.

Parámetros	Valor	Comentario
Duración de Subtrama	1 ms	-----
Duración de Slot	0.5 ms	-----
Espaciado entre Subportadoras	15 kHz	-----
Duración de Símbolo SC-FDMA	66.67 us	-----
Duración de CP (Prefijo Cíclico)	Normal CP: 5.2 us primer símbolo en cada slot 4.69 us todos los otros símbolos Extendido CP: 16.67 us todos los símbolos	
Número de Símbolos por Slot	Normal CP: 7 Extendido CP: 6	-----

Tabla 2.3: Parámetros de la capa física en LTE uplink SC-FDMA ^[6]

2.11. Técnicas de duplexación para LTE ^[35]

La duplexación es una técnica para obtener canales bi-direccionales para transmisión de datos en enlaces ascendentes y descendentes, el Sistema LTE soporta Duplexación por División de Tiempo (TDD) y Duplexación por División de Frecuencia (FDD).

2.11.1. Duplexación por división de tiempo (TDD)

Es un método bidireccional utilizado para transmisiones de enlace ascendente y descendente en la misma banda de frecuencia. TDD utiliza diferentes intervalos de tiempo por tanto, realiza una transferencia de datos asimétrica. (Figura 2.16).



Figura 2.16: Acceso bidireccional TDD [35]

2.11.2. Duplexación por división de frecuencia (FDD)

La técnica de FDD es bidireccional emplea dos bandas de frecuencias diferentes separados por una banda de guarda para minimizar la interferencia, envía y recibe datos al mismo tiempo por lo que se considera un método simétrico. (Figura 2.17).

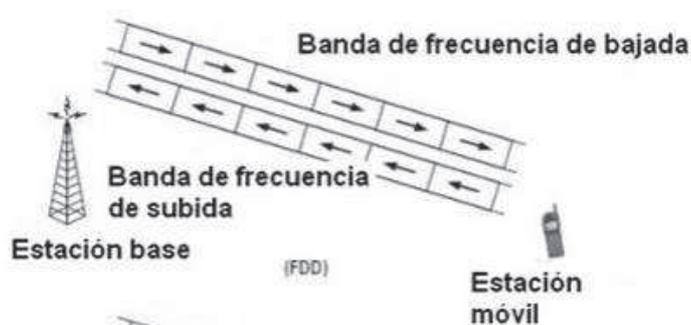


Figura 2.17: Acceso bidireccional FDD [35]

2.12. Técnicas de múltiples antenas [35]

La utilización de múltiples antenas en transmisión y recepción surge como una consecuencia para mejorar la comunicación inalámbrica con varias técnicas como la diversidad espacial, donde gracias al desarrollo de antenas inteligentes que permiten una estructura con múltiples antenas, se controla uno de los principales problemas del canal inalámbrico como es el desvanecimiento multitrayectoria y la disminución considerable de las interferencias lo que han dado pie al desarrollo de diversas técnicas con múltiples antenas como son: SIMO (*Single-Input Multiple-Output*), MISO (*Multiple-Input Single-Output*) y la técnica más

desarrollada, actualmente utilizada en los sistemas celulares LTE nombrada MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*). (Figura 2.18).

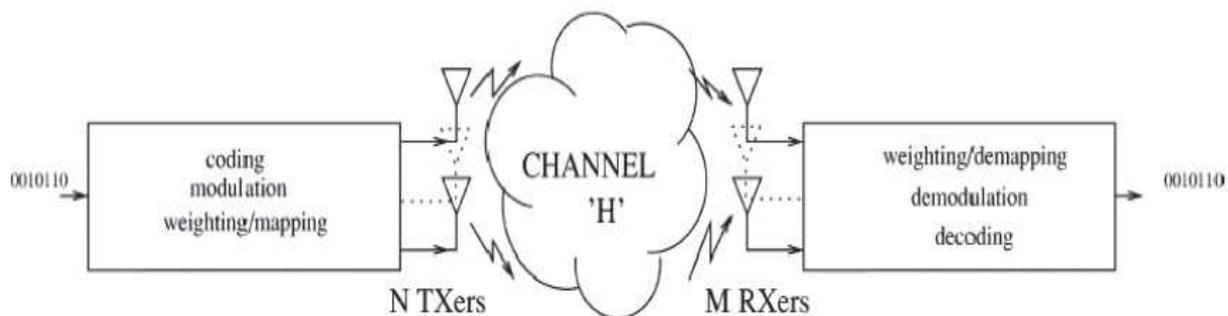


Figura 2.18: Sistema inalámbrico codificado MIMO [35]

2.12.1. Configuración SIMO (*Single-Input Multiple-Output*) [35]

Esta configuración de múltiples antenas (SIMO) expresa la utilización de un transmisor y dos o más receptores. Generalmente se ocupa una configuración 1x2. El tipo de acceso SIMO es especialmente útil para tener una baja relación señal-ruido (SNR). Lo que permite mejorar la cobertura en el borde de la celda y bajar los niveles de pérdidas.

La fórmula para calcular la capacidad que pueden llegar los sistemas con SIMO es la siguiente:

$$C = \log_2 \left(1 + \rho \sum_{i=1}^M |h_i|^2 \right)$$

Donde:

h_i : es la ganancia compleja normalizada del canal por cada trayectoria.

M : es el número de antenas receptoras, cuyo aumento produce solamente un incremento logarítmico en la capacidad promedio.

ρ : Relación señal a ruido (SNR)

2.12.2. Configuración MISO (*Multiple-Input Single-Output*) ^[35]

En la configuración para un sistema MISO se utiliza dos o más antenas transmisoras, pero solo una antena receptora, para un sistema MISO con N antenas de transmisión, la capacidad está dada por:

$$C = \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{N} \sum_{i=1}^N |h_i|^2 \right)$$

Donde:

ρ : Relación señal a ruido (SNR)

h_i : es la ganancia compleja normalizada del canal por cada trayectoria.

N : es el número de antenas transmisoras que permiten la normalización para asegurar una potencia de transmisión total fija.

2.12.3. Configuración MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) ^[35]

Para la configuración de un sistema MIMO se tiene N antenas en transmisión y M antenas en recepción, la capacidad de MIMO se ve reflejada en su canal de transmisión y la diversidad que puede alcanzar al ser transmitida en varias direcciones, por lo que se ha desarrollado una matriz para interpretar la relación de cada una de las antenas que intervienen en el sistema; en la Figura 2.19 se observa la representación de las antenas y la posterior composición de la matriz.

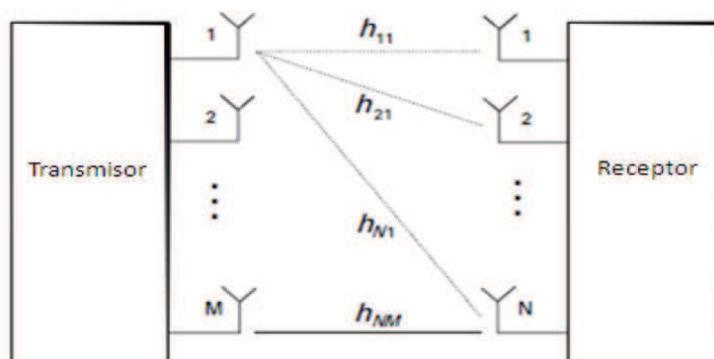


Figura 2.19: Sistema MIMO de $N \times M$ ^[35]

Representación de la matriz MIMO NXM [35]

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N1} & \cdots & h_{NM} \end{bmatrix}$$

Donde:

h_{ij} h_{NM} : es la ganancia compleja normalizada del canal por cada trayectoria.

Por tanto la capacidad de un sistema MIMO se obtiene con la siguiente expresión:

$$C_{EP} = \log_2 \left[\det \left(I_M + \frac{\rho}{N} HH^* \right) \right]$$

Donde:

ρ : Es la relación señal a ruido (SNR)

N : Es el número de antenas transmisoras que permiten la normalización para asegura una potencia de transmisión total fija.

HH^* : Es la multiplicación de la matriz de las ganancias normalizadas por su matriz transpuesta, dando una matriz de orden $M \times M$ y multiplicada por el escalar de $\frac{\rho}{N}$.

I_M : Es una Matriz Identidad que se suma a la respuesta de la matriz de orden $M \times M$.

\det : es la operación determinante sacado al resultado de la suma de I_M y el resultado de la matriz $M \times M$.

Sin embargo existe la certeza que la capacidad en un sistema MIMO aumenta de forma lineal conforme se aumenta el número de antenas, cuando las antenas emiten la misma potencia, dando como resultado la suma de las expresiones de Shannon de cada ganancia compleja normalizada del canal.

2.12.3.1. Caracterización de las estructuras MIMO ^[35]

Las estructuras de Múltiples antenas se caracterizan por presentar:

2.12.3.1.1. Beamforming (Configuración de Haz)

Permite la formación de un haz bien determinado, desfasando la señal en las distintas antenas. Dando como resultado una mayor ganancia y provocando una menor atenuación.

2.12.3.1.2. Diversidad de código

Es una técnica utilizada cuando se tiene un único canal, se codifica la transmisión mediante espaciado en el tiempo y la diversidad de señales disponibles dando lugar al código espacio-tiempo. Para aumentar la diversidad de la señal se recurre a una emisión desde varias antenas basándose en principios de ortogonalidad.

2.12.4. MIMO multiusuario (MU MIMO) ^[36]

MIMO multiusuario (*Multi User MIMO*) es una extensión de las estructuras MIMO vistas anteriormente que se denominan SU MIMO (*Single User MIMO*), estas estructuras MU MIMO mejoran las prestaciones del enlace entre la estación de base y un móvil, habilitando para ello varios caminos paralelos, contribuyendo con la reutilización de trayectorias, ayuda compartiendo la misma banda de frecuencias para varios terminales a la vez. La principal diferencia entre SU-MIMO y MU-MIMO es el aumento de la capacidad de la celda. (Figura 2.20)

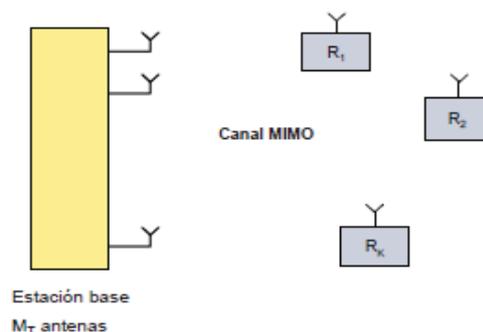


Figura 2.20: Esquema MIMO Multiusuario [36]

2.12.4.1. Comparación entre estructuras MIMO y MU MIMO [36]

Las estructuras MU MIMO por ser una extensión de MIMO no está completamente desarrollada por lo cual presentan ciertos inconvenientes con respecto a las les MIMO convencional:

- Efecto cerca-lejos.- En la estructura MU MIMO puede haber significativas diferencias en las pérdidas de propagación entre cada usuario.
- Para obtener el MU MIMO se debe pasar por una programación especial, que permita un multiplexado espacial.

Beneficios que presentan las estructuras MU MIMO:

- ❖ Al elegir MU MIMO proporcionan diversidad de multiusuario.
- ❖ Reduce la necesidad de que los móviles tengan múltiples antenas, de hecho bastaría con una antena en los móviles para que una estructura MU MIMO sea factible.

2.13. Esquemas de modulación y demodulación usados en LTE [37]

2.13.1 Modulación de fase de cuadratura (QPSK)

QPSK es una modulación en cuadratura consecuencia de PSK modulación digital por fase, se dice que $M=4$, donde M es el desplazamiento de fase por ende en esta modulación se desplazaran 4 símbolos entre sí a 90° . Los símbolos se

encuentran ubicados en la fase 45° , 135° , 225° , y 315° respectivamente. Cada uno de los símbolos aporta 2 bits. Para reducir los bits errados la asignación de bits para cada símbolo se hace mediante el código Gray, Dando como resultado la siguiente constelación. (Figura 2.21)

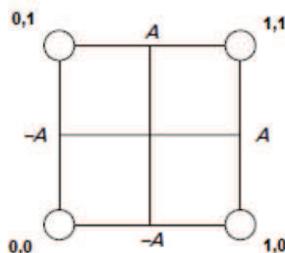


Figura 2.21: Constelación QPSK [37]

Como se puede observar en la Figura 2.21, la constelación tiene valores de amplitud de A y $-A$, lo que ayuda a calcular la PAPR (*The peak-to average-power ratio*) o potencia promedio pico de la siguiente manera:

$$PAPR_{QPSK} = \frac{(A^2 + A^2)}{1} = 1.0 = 0.0dB$$

Dando como resultado que la PAPR para QPSK es 0.0 dB, por tanto es una señal de forma constante.

2.13.2. Modulación QAM [37]

Modulación de Amplitud de Cuadratura (QAM), es otro tipo de modulación digital en la cual el mensaje se encuentra contenido tanto en la amplitud como en la fase de la señal transmitida. Se basa en la transmisión de dos mensajes independientes por un único camino, esto se consigue modulando en la misma portadora, desfasada 90° una de la otra formando dos canales ortogonales en el mismo ancho de banda. (Figura 2.22).

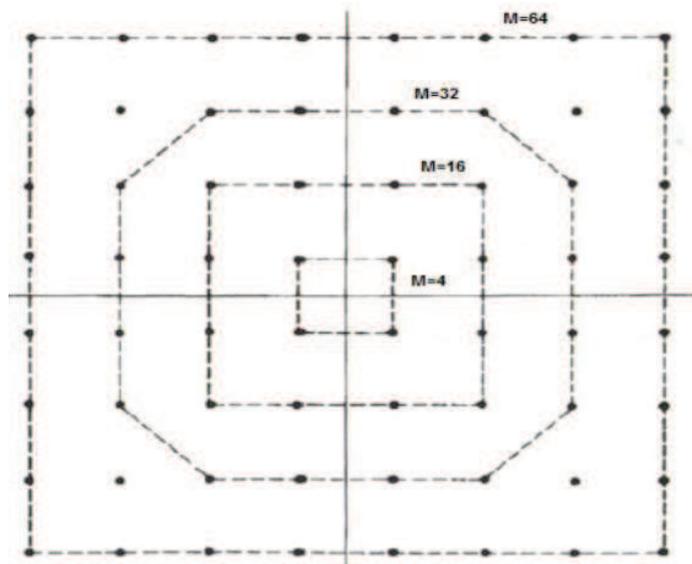


Figura 2.22: Constelaciones QAM [37]

2.13.3. Modulación en amplitud de cuadratura de 16 símbolos (16-QAM)

La modulación 16-QAM es utilizada en sistemas celulares como LTE. Los componentes de la constelación toman los valores de amplitud de A , $3A$, $-A$ y $-3A$ como se a continuación en el diagrama de constelación: (Figura 2.23)

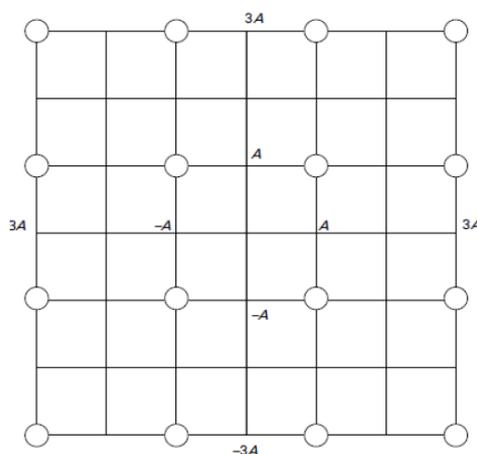


Figura 2.23: Constelación de 16-QAM [37]

El PAPR (*The peak-to average-power ratio*) o potencia promedio pico máximo para 16-QAM de $3A$ Y $-3A$ es:

$$PAPR_{16-QAM} = \frac{(9A^2 + 9A^2)}{1} = 1.8 = 2.55dB$$

Mientras que para los puntos interiores 16-QAM de A y $-A$, el PAPR es:

$$PAPR_{16-QAM} = \frac{(A^2 + A^2)}{1} = 0.2 = -7dB$$

Los resultados de 16-QAM indican que el PAPR (The peak-to average-power ratio) contiene 16 símbolos 4 tienen 2.55 dB y otros 4 símbolos tienen -7dB.

2.13.4. Modulación en amplitud de cuadratura de 64 símbolos (64-QAM) ^[37]

64-QAM es también otra modulación utilizada en sistemas celulares. Teniendo una unidad de potencia media, los componentes de la constelación toman los siguientes valores de amplitud de A , $3A$, $5A$, $7A$, $-A$, $-3A$, $-5A$ y $-7A$. (Figura 2.24)

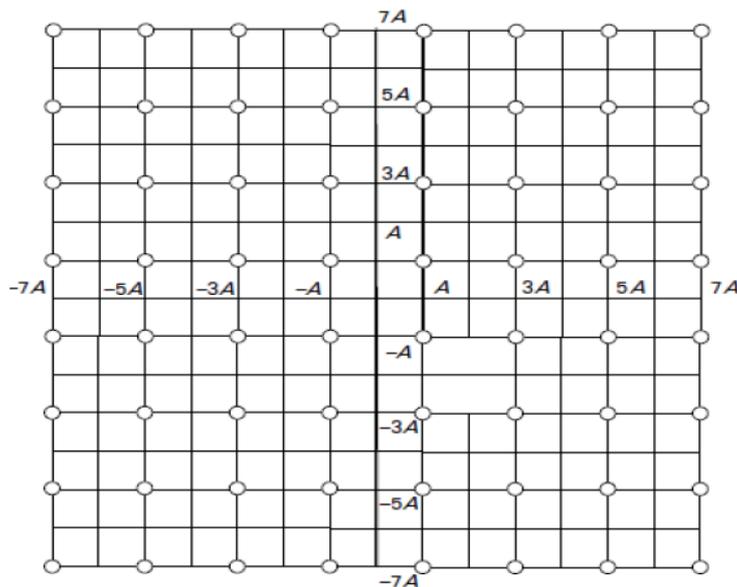


Figura 2.24: Constelación de 64-QAM ^[37]

El PAPR (The peak-to average-power ratio) máximo para 64-QAM, se calcula de la siguiente manera:

$$PAPR_{64-QAM} = \frac{(49A^2 + 49A^2)}{1} = \frac{98}{42} = 3.68dB$$

2.14. Capa física ^[12]

Después de haber descrito las tecnologías usadas en la capa física de la interfaz aire del sistema LTE, se procede a describirla formalmente. La capa física del sistema LTE está basada en la utilización de técnicas de acceso múltiple OFDMA en el enlace descendente (*downlink*) y SC-FDMA en el enlace ascendente (*uplink*). En los dos enlaces tiene una separación entre subportadoras de 15KHz y el número de portadoras es variable provocando el cambio de ancho de banda en función a la aplicación requerida por el usuario. LTE puede operar en bandas de 2600 MHz, 2100 MHz, 1900 MHz, 1800 MHz, 1700MHz, 850 MHz, 800MHz, 700 MHz para su comercialización y en laboratorio ha funcionado en bandas que van desde los 450 MHz hasta los 3,5 GHz. Por ende, el estándar define hasta 40 posibles bandas de operación trabajando en FDD o en TDD, como se muestra en la Tabla 2.4.

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

Tabla 2.4: Frecuencias de LTE ^[12]

Los esquemas de modulación soportados por capa física de LTE en enlace downlink y uplink son: QPSK, 16QAM y 64QAM; los fundamentos de estas técnicas fueron explicadas en el subtema anterior, sin embargo, queda decir que varias veces el tipo de modulación depende exclusivamente del móvil.

LTE emplea técnicas MIMO de varias clases dependiendo del Release que van desde MIMO 2 x 2 en LTE normal, hasta la técnica MIMO de 8 x 8 en LTE *Advanced*.

Tomado en cuenta los parámetros que interviene en la capa física la velocidad depende del ancho de banda y para LTE Release 8, se muestra en la Tabla 2.5 sus posibles velocidades:^[12]

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Velocidad Pico Total (Mb/s)	≅ 6	≅ 15	≅ 25	≅ 50	≅ 75	≅ 100
Velocidad pico de usuario (Mb/s) (15% de los recursos destinados a control y señalización)	≅ 5,1	≅ 12,8	≅ 21	≅ 42,5	≅ 63,7	≅ 85

Tabla 2.5: Velocidades pico en función de la canalización ^[36]

Como se indicó en la Tabla 2.5, no toda la velocidad transmitida es de datos, también incluyen el 15% correspondiente a los recursos de control y señalización. En el caso de considerar una estructura MIMO más robusta se puede decir que las velocidades aumentarán.

Por último, cabe señalar que aparte de la capa física en LTE, al igual que en todos los sistemas inalámbricos, las velocidades reales alcanzadas por un usuario dependen de varios factores, como son: La calidad del canal de radio, el número de usuarios simultáneos en la celda, el tipo de servicio considerado y la calidad (QoS) asociada, la capacidad del terminal móvil, etc. Es por ello que en el siguiente capítulo se realiza una simulación del canal inalámbrico para tener una idea de que velocidad tendría el sistema LTE con las dificultades predichas.

2.14.1. Estructura de la trama LTE ^[12]

Para la trama LTE se han determinado dos posibles estructuras dependiendo del duplexado a utilizarse:

2.14.1.1. Estructura de trama tipo 1

Esta estructura de trama es válida cuando el duplexado se lo realiza por división de frecuencia FDD.

La estructura de la trama es conformada por 10 subtramas cada una con duración de 1 ms, las subtramas se dan por la formación de 2 slots o ranuras temporales (TS) de duración de 0,5 ms.

En las ranura temporal (TS) se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDM cada uno de ellos de duración $T_s = 66,7\mu s$. En el caso de utilizar 7 símbolos, el Prefijo Cíclico (CP), tiene una duración de $4,7\mu s$. Si el prefijo cíclico (CP) utiliza 6 símbolos, se denomina prefijo cíclico largo y tiene una duración de $16,67\mu s$. Normalmente, en celdas muy grandes se utiliza una estructura de 6 símbolos por ranura temporal ya que los retardos de propagación pueden llegar a ser de algunos μs , lo que requiere un mayor prefijo cíclico para compensar la propagación multitrayectoria. (Figura 2.25)

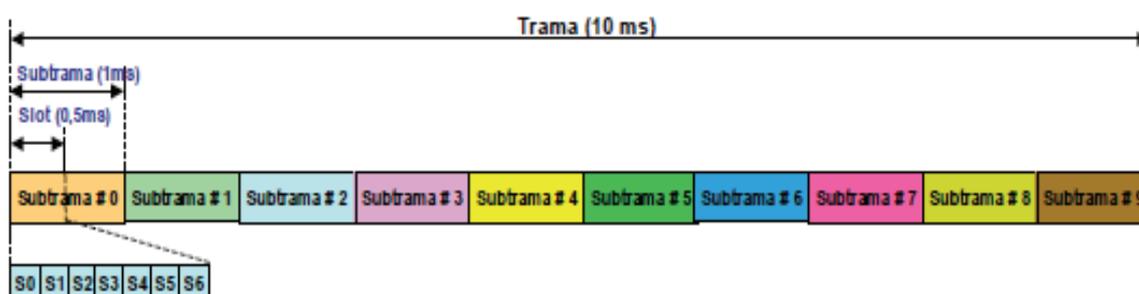


Figura 2.25: Estructura de trama tipo 1 ^[36]

2.14.1.2. Estructura de trama tipo 2 ^[12]

Esta estructura es óptima cuando se opera con duplexación por división de tiempo TDD.

Se compone de 10 slots, cada uno de duración 1 ms, esta trama es más flexible que la trama de FDD; la trama TDD posee 3 campos más que la trama FDD los que le dan la característica de ser más flexible, además, se lo puede dividir en dos subtramas compuestas de 5 slots de tiempo de 5 ms cada una. Esta subtrama ayuda a la transición entre los enlaces descendente y ascendente por razones de sincronización. (Figura 2.26)

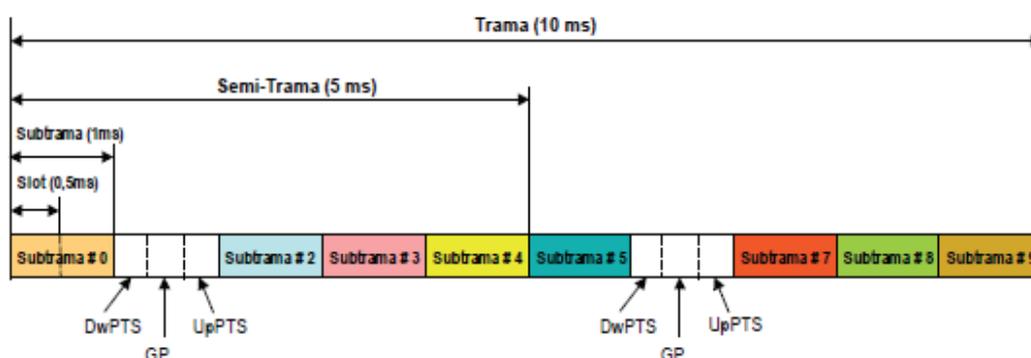


Figura 2.26: Estructura de trama tipo 2 ^[36]

Los 3 campos especiales que tienen la trama TDD, se detallan a continuación:

- DwPTS: Se presenta en el enlace descendente y tiene una longitud mínima de 1 símbolo OFDM. Este símbolo es utilizado para precisar la señal de sincronización en el modo TDD.
- UpPTS: Se presenta en el enlace ascendente, está compuesto por 2 símbolos OFDM donde se envía un preámbulo corto de acceso aleatorio.
- GP: Es utilizado para representar el periodo de guarda. La longitud del mismo depende de los campos anteriores.

2.15. Canales físicos ^[12]

La capa física de LTE posee sus propios canales para transportar información y control, los canales se dividen de acuerdo al enlace en downlink y uplink.

2.15.1. Canales físicos para enlace downlink ^[12]

Para el sistema LTE existen dos clases de canales físicos en downlink: los canales físicos de tráfico encargados de transmisión de información en modo compartido y los canales físicos de control para establecer la comunicación a través de la interfaz inalámbrica, permitiendo la comunicación a nivel de capas.

- Canal físico compartido en el enlace descendente o *physical downlink shared channel* (PDSCH)

PDSCH es un canal de tráfico de la capa física contiene la información entregada por la capa MAC, es asignado a un abonado cuando va a recibir alguna información, soporta los esquemas de modulación de LTE.

- Canal físico de multidifusión o *physical multicast channel* (PMCH)

PMCH es otro canal de tráfico correspondiente a la capa física, la principal función de este canal es transportar información para varios usuarios de la celda en una comunicación multicast.

- Canal físico de difusión o *physical broadcast channel* (PBCH)

PBCH es un canal de control donde se transporta información de la red, en un bloque denominado master information block (MIB).

El bloque MIB está compuesto de 14 bits de información, 10 bits de relleno y 16 bits de código de redundancia cíclica.

- Canal físico de control de enlace descendente o *physical downlink control channel* (PDCCH)

PDCCH es un canal físico de control cuya función es informar al móvil sobre los recursos del enlace descendente también conocido como downlink control information (DCI), lleva información acerca de la modulación, codificación, información de retransmisión y comandos para el control de la potencia.

- Canal físico de control indicador de formato o *physical control format indicator channel* (PCFICH)

El canal PCFICH es utilizado para transmitir información sobre el número de subportadoras a utilizarse en la comunicación, dependiendo de la aplicación por su flexibilidad de ancho de banda.

- Canal físico indicador híbrido de protocolo ARQ o *physical hybrid ARQ indicator channel* (PHICH)

PHICH es otro canal físico de control donde se informa los acuses de recibo con ACK cuando el acuse de recibo es positivo y NACK cuando el acuse de recibo es negativo.

2.15.2. Canales Físicos para enlace uplink ^[12]

Al igual que en el enlace downlink el enlace de uplink posee canales de físicos de tráfico y de control los cuales son descritos a continuación:

- Canal físico compartido en enlace ascendente o *physical uplink shared channel* (PUSCH)

El canal PUSCH es utilizado para enviar la información del usuario en el enlace uplink.

- Canal físico de control para enlace ascendente o *physical uplink control channel* (PUCCH)

PUCCH es el canal físico de control en enlace uplink, el cual permite transmitir 3 requerimientos claves de información:

- ✓ Lleva información de la asignación de recursos del canal.
- ✓ Contiene acuses de recibo, ACK cuando es positivo y NACK cuando es negativo.
- ✓ Transporta información de la calidad del canal.

- Canal físico de acceso aleatorio o *physical random access channel* (PRACH)

PRACH es el canal físico de control que permite acceso aleatorio; transporta información de potencia inicial de transmisión, número de reintentos de reenvío de la información y granularidad de la potencia.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN DEL CANAL INALÁMBRICO Y MODELO DE PROPAGACIÓN

3.1. Introducción

Conociendo los fundamentos teóricos del sistema LTE y con el estudio del medio de transmisión (la interfaz aire), realizado en los capítulos anteriores, se tiene una comprensión fundamentada de cómo va a realizarse la comunicación en el sistema celular LTE, sin embargo, para tener una descripción más próxima a la realidad, en este capítulo se procede al desarrollo de una simulación, con la herramienta de MATLAB en su interfaz gráfica denominada GUIDE, en esta simulación se toma en consideración los efectos del canal con distribuciones Rice y Rayleigh, en un modelo de propagación básico para el entendimiento denominado Okumura-Hata, en frecuencias y con niveles de potencia previstos en *Long Term Evolution*, abarcando la mayor parte de los tópicos mostrados en los capítulos anteriores, dando una conceptualización gráfica del funcionamiento del sistema celular LTE y LTE *Advanced*, este simulador tiene la funcionalidad de proveer de datos específicos de cómo se encuentra el canal en determinadas condiciones.

3.2. Generalidades MATLAB ^[38]

MATLAB es una herramienta matemática de buenas características, que permite realizar programas en un lenguaje de alto nivel diseñado para realizar cálculos técnicos muy exigentes. MATLAB soporta problemas matriciales y escalares sin inconvenientes, es una de las herramientas más usadas en todas las ingenierías para resolución de problemas de gran envergadura, proporcionando una gran precisión y resolviendo los problemas en menor tiempo lo que beneficia a los

usuarios de esta herramienta, por estos motivos MATLAB es ampliamente utilizado en:

- Cálculos numéricos
- Desarrollo de algoritmos
- Modelado, simulación y prueba de prototipos
- Análisis de datos, exploración y visualización
- Graficación de datos con fines científicos o de ingeniería
- Desarrollo de aplicaciones que requieran de una interfaz gráfica de usuario (GUIDE, *Graphical User Interface Development Environment*)

Como se describió en los puntos anteriores, MATLAB es una herramienta matemática bastante robusta, que fue escogida para el desarrollo de la simulación, además MATLAB cuenta con familias de comandos en áreas específicas llamadas toolboxes y sin duda una gran parte de estos comandos han sido desarrollados para el área de comunicaciones y procesamiento digital de señales, lo cual es fundamental para el desarrollo de la simulación, permitiendo con su interfaz gráfica un modo de uso intuitivo, que favorece a las personas que requieran utilizar la simulación.

Para la simulación del canal Inalámbrico y modelo de propagación para frecuencias de LTE, se ha utilizado la versión de MATLAB R2013a cuya presentación se la puede ver en la Figura 3.1.

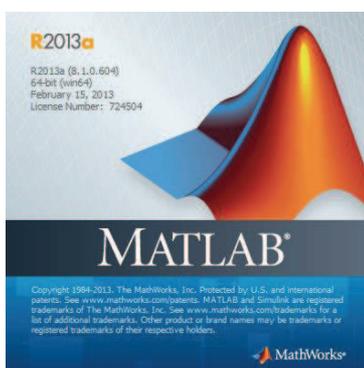


Figura 3.1: Imagen de MATLAB [40]

3.3. GUIDE (interfaz gráfica de MATLAB) [39]

Interfaz gráfica de MATLAB - GUIDE (*Graphical User Interface Development Environment*) es el entorno de programación gráfica disponible en MATLAB para introducción de datos y ejecutar programas de forma bastante sencilla para el usuario final, tiene características similares a otros programas de interfaz gráfica como visual studio entre otros.

Forma de ejecución de la interfaz GUIDE:

Tiene dos formas para su uso:

- 1) Una de las formas de ejecución de la interfaz GUIDE, es por comandos y consiste en poner en su interfaz de comandos la palabra "GUIDE" como se puede observar en la Figura 3.2.



Figura 3.2: Ventana de Comandos de MATLAB [40]

- 2) Otra forma de ejecución de la interfaz GUIDE, es por medio de su menú de opciones que varía de versión a versión de MATLAB, como se puede observar en la Figura 3.3.

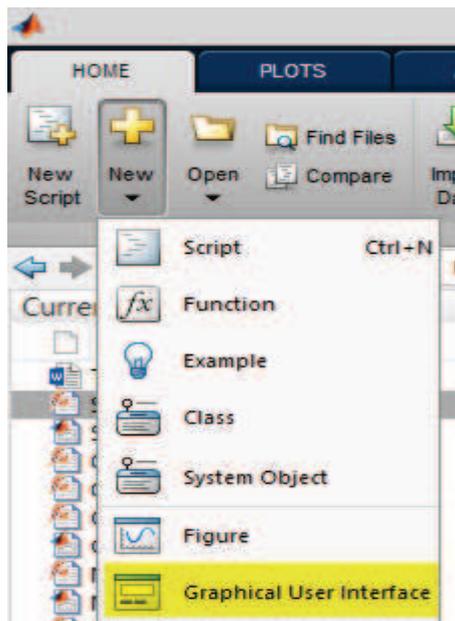


Figura 3.3: Interfaz de MATLAB [40]

Una vez ejecutada la interfaz GUIDE, de cualquiera de las dos formas aparece una pantalla llamada “inicio rápido de GUIDE” como se puede ver en la Figura 3.4. [39]

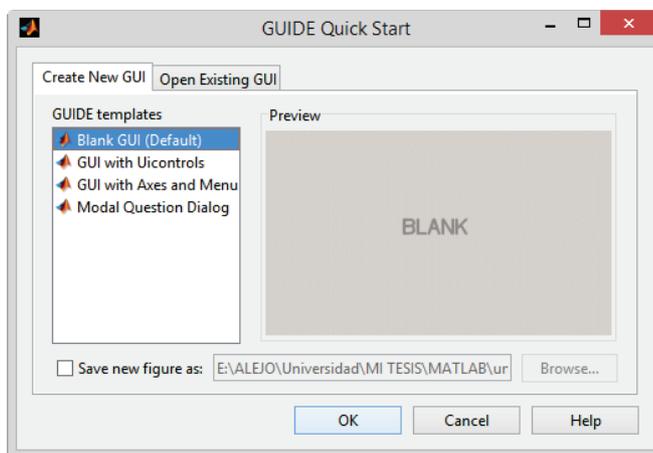


Figura 3.4: Inicio rápido de GUIDE [40]

Estando en la Figura 3.4, se puede observar marcada la opción blank GUI (Default), esta opción da la posibilidad de obtener una interfaz completamente en blanco para poder desarrollar y personalizar una interfaz propia.

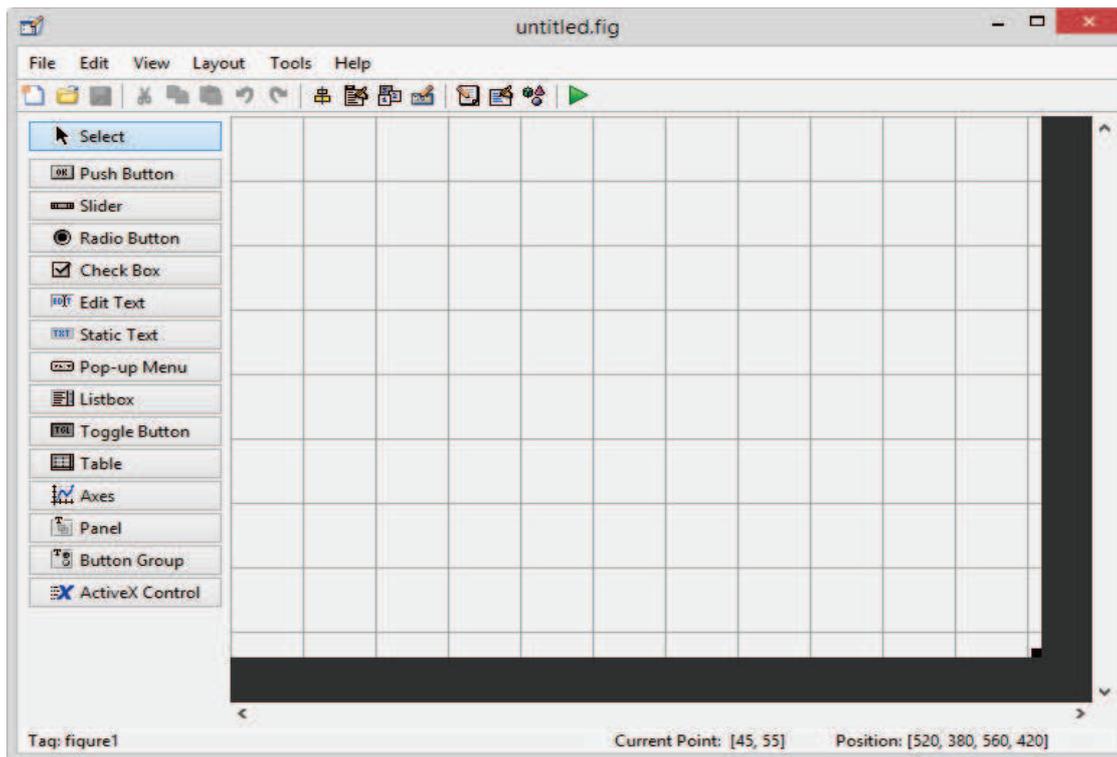


Figura 3.5: Figura GUI de MATLAB ^[40]

En la Figura 3.5 denominada “Figura GUI de MATLAB”, se realizan dos tareas básicas para el comienzo de una interfaz que son: el reparto o distribución de los componentes de la interfaz y la programación de cada uno de los componentes. GUIDE esencialmente es un conjunto de herramientas para la personalización de la interfaz, pero también facilita el acceso al archivo M-File que contiene el código que maneja la interfaz gráfica. El archivo m-file constituye un marco para la implementación de los callbacks es decir, las funciones que se ejecutan cuando los usuarios activan los componentes o botones en la interfaz GUI.

3.4. GUI: Representación gráfica de funciones ^[40]

A continuación en la Tabla 3.1, se indica la función de algunos botones para la elaboración de la interfaz gráfica.

Componente	Icono	Descripción
Push Button		Invoca un evento inmediatamente. Por ejemplo, un botón Aceptar podría aplicar la configuración y cerrar un cuadro de diálogo. Al hacer clic en un botón de comando, aparece deprimido; Cuando suelte el botón del ratón, el botón aparece elevado.
Slider		Usado para representar un rango de valores, permite al usuario mover una barra de deslizamiento.
Radio Button		Indica una opción que puede ser seleccionada.
Check Box		Indica el estado de una opción o atributo. Las casillas de verificación son útiles cuando se proporciona al usuario un número de opciones independientes.
Edit Text		Caja para editar texto, permite a los usuarios introducir o modificar las cadenas de texto. Los usuarios pueden introducir números pero debe convertirlos a sus equivalentes numéricos.
Static Text		Muestra un string de texto en una caja. Estos controles de texto estático se utiliza normalmente para etiqueta otros controles, proporcionan instrucciones para el usuario o indicar los valores asociados a un control deslizante. Los usuarios no pueden cambiar texto estático interactivamente.
Pop-Up Menu		Menús emergentes abren para mostrar una lista de opciones cuando los usuarios hacen clic en la flecha.
List Box		Muestra una lista deslizablede elementos y permiten a los usuarios seleccionar uno o más elementos.
Toggle Button		Botones de solo dos estados, "on" o "off", generan una acción e indican si está activadas o desactivada.
Table		Genera una tabla
Axes		Permiten mostrar gráficos e imágenes. Al igual que todos los objetos gráficos.
Panel		Paneles para organizan los componentes de la GUI en grupos. Al agrupar visualmente los controles relacionados, los paneles pueden hacer la interfaz de usuario más fácil de comprender.
Button Group		Permite exclusividad de selección con los radio button.
ActiveX® Component		Componentes ActiveX le permiten mostrar controles ActiveX en la GUI. Ellos sólo están disponibles en la plataforma Microsoft ® Windows ®.

Tabla 3.1: Funciones de la interfaz GUI de MATLAB ^[41]

Después de haber realizado el diseño de la interfaz gráfica, se puede mejorar su estructura con las opciones de la barra de herramientas mostrada en la Figura 3.6, las opciones se detallan en la Tabla 3.2.



Figura 3.6: Barra de herramientas de la interfaz GUI ^[40]

Componente	Icono	Descripción
Align Object		Sirve para alinear los componentes de la interface pudiendo ordenarlo verticalmente o horizontalmente con una separación determinada.
Menu Editor		Con esta opción se pueden crear los menús de la interface, como el menú “Abrir”, “Guardar” o “Ajustar” que la mayoría de programas tienen.
Tab Order Editor		Sirve para cambiar el orden de los button de un panel.
Toolbar Editor		Se puede crear una barra de herramientas con las opciones de Zoom in, Zoom out, Imprimir, Abrir, Guardar, etc.
M-file editor		Abre el editor de archivos .m.
Property Inspector		Con este icono se puede editar las propiedades de un componente, como el color, la mida, cambiar el nombre del componente, etc.
Object Browser		Sirve para modificar todos los componentes que existen en la pantalla de la interface, pudiendo seleccionarlos y editarlos desde allí mismo.
Run Figure		Permite simular la interfaz.

Tabla 3.2: Barra de tareas de la interfaz GUI de MATLAB ^[41]

3.5. Diagrama de flujo de GUIDE ^[41]

Como todo programa, la interfaz de usuario de MATLAB se rige a un diagrama de flujo para el control sobre las operaciones a realizar en el código programado. Es decir especifica una guía de cómo se va a comportar el botón al pulsar llamado “ejecutar”. En la Figura 3.7 se muestra cómo es el proceso de construcción de un programa mediante el diagrama de flujo recomendado por MATLAB y puesto en práctica en la realización de esta simulación.

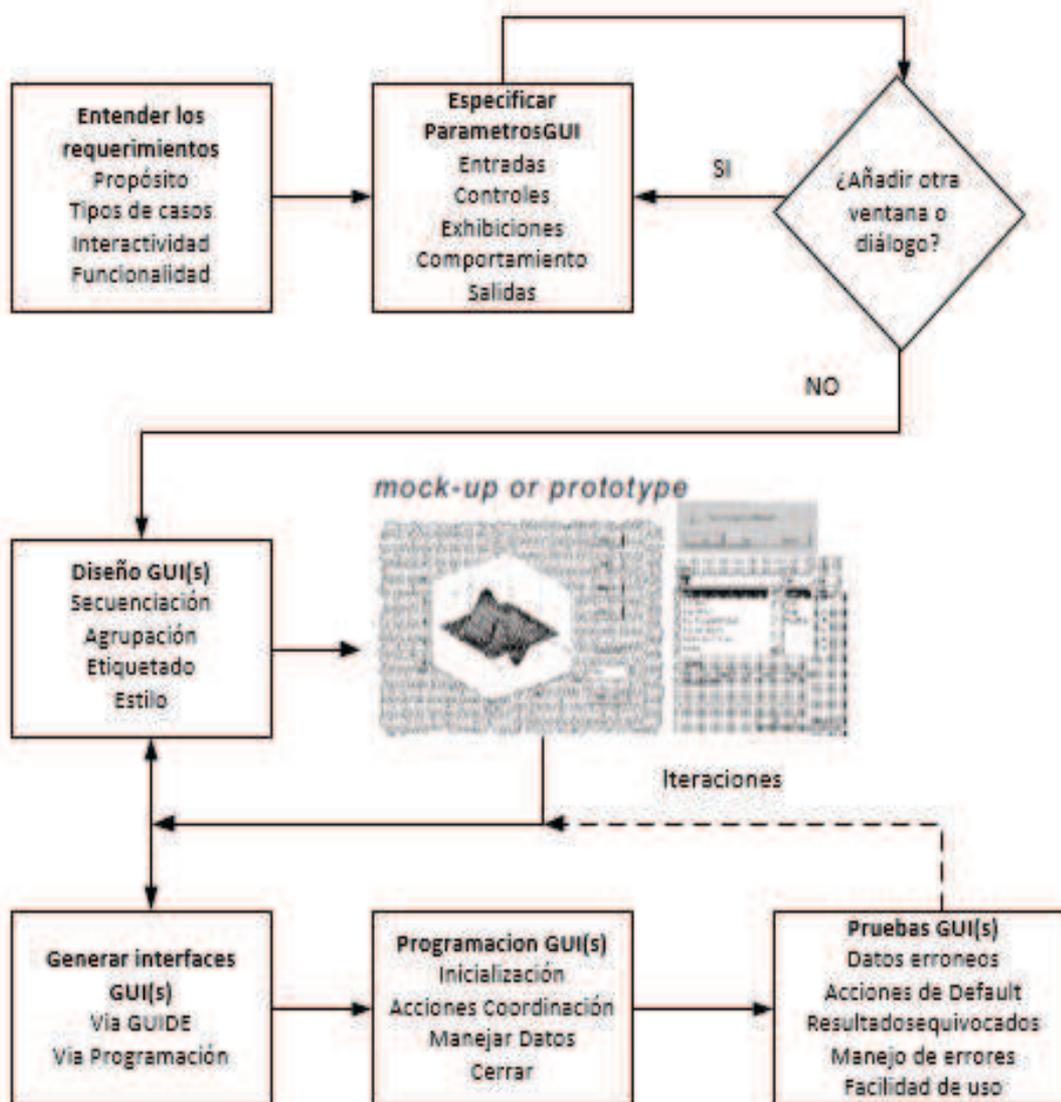


Figura 3.7: Diagrama de flujo aplicaciones GUI-MATLAB ^[42]

3.6. Principales funciones de MATLAB para GUIDE ^[40]

Una vez indicada la forma y estructura de la interfaz gráfica GUIDE de MATLAB, se procede a mostrar las principales funciones utilizadas en MATLAB, las mismas que permiten la interacción entre los bloques visuales y las funciones escritas en código, así se tienen 3 bloques fundamentales de estructuras, que siempre se tendrán presentes al momento de programar cualquier interfaz de usuario en MATLAB, estas sentencias toman los nombres de:

- ✓ Handles
- ✓ Get y set
- ✓ Mensajes por pantalla

3.6.1. Manejo de datos (*Handles*) ^[40]

Handles o manejo de datos es una estructura que sirve para manejar los datos introducidos por el usuario.

Cuando se escribe un dato en la interfaz gráfica, se guarda dicho valor proporcionado en su respectiva función o callback, sino se guarda, esa variable no se la puede usar posteriormente.

Handles se lo utiliza mediante la instrucción: “guidata(hObject,handles)”

Para acceder a ese valor almacenado se utiliza la estructura handle, funciona con la siguiente sintaxis “**handles.el nombre de la variable**”.

3.6.2. Obtener y asignar (*get and set*) ^[40]

Estas dos funciones (*get* y *set*) son usadas para obtener y asignar valores a los componentes, respectivamente.

La función *get* sirve para leer el valor de la data, mientras que la función *set* controla donde se quiere colocar el dato.

La sintaxis de las funciones es la siguiente:

```
“get(handle.origen,'parámetro’) “  
“set(handle.destino,'parámetro', dato)”
```

3.6.3. Mensajes por pantalla ^[40]

Mensajes por pantalla son utilizados para informar al usuario de alguna anomalía, aviso, incidente que requiere su atención, es una forma de dar una guía al usuario final que utiliza el programa. Los mensajes que se pueden mostrar en la pantalla de la interfaz gráfica son:

```
warndlg('Mensaje de aviso', 'Aviso');  
errordlg('Mensaje de error', 'Error');  
helpdlg('Mensaje de ayuda', 'Ayuda');  
msgbox('Mensaje', 'Mensaje');  
questdlg('Mensaje pregunta', 'Pregunta');
```

En la simulación realizada en este proyecto, el mensaje de error es utilizado para advertir a los usuarios que están ingresando un dato no definido dentro de los parámetros de la aplicación.

3.7. Estructura del programa

Hasta este punto, el proyecto se ha enfocado en explicaciones teóricas de los fundamentos de la tecnología LTE, se ha dado una inducción del canal inalámbrico para tener una idea completa de cómo se realiza la comunicación en este nuevo sistema de comunicación y en este capítulo se ha desarrollado un resumen de los temas sobresalientes de MATLAB con su interfaz gráfica GUIDE, esto tiene como objetivo encaminar al tema central de este proyecto que es la simulación del canal móvil para bandas de LTE con distribuciones Rice, Rayleigh y el modelo de propagación Okumura-Hata.

Esta simulación se presenta como un estudio de la tecnología LTE, orientada a personas con conocimientos en temas de comunicaciones móviles, puede ser utilizado por estudiantes o profesionales en el área de tecnología, para orientarse de cómo va estar la señal en diferentes ambientes. El software descrito se compone de 5 interfaces gráficas programadas enteramente en MATLAB, con

aditamentos como ayudas y otros submenús, cuidando los detalles estéticos y de funcionalidad que se investigaron, siguiendo un esquema de construcción descrito en las mejores prácticas de MATLAB.

A continuación se enlistan las 5 interfaces gráficas, para luego desagregarlas e indicar la forma que se realizó la programación de cada interfaz.

- ✓ SIMULADOR_LTE
- ✓ Menu_Principal
- ✓ OKUMURA_HATA
- ✓ NLOS (Distribución Rayleigh)
- ✓ LOS (Distribución Rice)

3.7.1. SIMULADOR LTE

La estructura del programa se fundamenta en interfaces gráficas amigables con el usuario, en esta sección se describe la primera interfaz llamada “SIMULADOR_LTE”, la misma que se muestra como portada del simulador, se la puede observar en la Figura 3.8.

En la Tabla 3.3 se describen los componentes de la interfaz SIMULADOR_LTE.

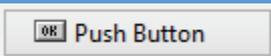
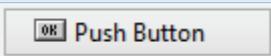
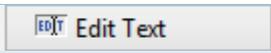
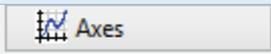
Elemento	Icono	Utilización
btn_principal		Se utiliza para programar el enlace de la interfaz del menú principal.
btn_exit		Se utiliza para programar el botón de salida
edit_text		Se utiliza para mostrar el texto en la interfaz
Imagen		Se utiliza para mostrar el logo de la interfaz

Tabla 3.3: Botones utilizados en SIMULADOR_LTE

Aparte de los elementos descritos en la Tabla 3.3, se programó algunos submenús y herramientas que ayudan al usuario final a movilizarse entre interfaces.

Como se puede ver en la Figura 3.8, se tiene la interfaz GUIDE, denominada SIMULADOR_LTE, la cual solo presenta el escudo de la Escuela Politécnica

Nacional y la carátula con la descripción del proyecto, su principal función es direccionar a la pantalla del “Menú Principal”.



Figura 3.8: Interfaz SIMULADOR_LTE

Código Fuente de los elementos de la interfaz gráfica:

```
% --- Programación de logo utilizado en la Interfaz SIMULADOR_LTE
function SIMULADOR_LTE_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% Definición de posición y tamaño del logo
axes('Units','Normalized','Position',[0 0 1 1]);
[x,map]=imread('EPN_logo.jpg','jpg');
image(x, colormap(map), axis off, hold on

% --- Programación del btn_principal.
function btn_principal_Callback(hObject, eventdata, handles)
Menu_Principal
close(gcf)
% --- Programación del btn_exit.
function btn_exit_Callback(hObject, eventdata, handles)
close(gcf);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%PROGRAMACION DE SUB-MENUS%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% -----
function Ejecutar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% -----
function Inicio_Callback(hObject, eventdata, handles)
SIMULADOR_LTE
% -----
function menu_prin_Callback(hObject, eventdata, handles)
Menu_Principal
```

```

close(gcbf)
% -----
function Ir_a_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Ir_a (see GCBO)
% -----
function Tesis_Callback(hObject, eventdata, handles)
winopen('TESIS_AF.docx')
% -----
function Presentacion_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Presentacion (see GCBO)
% -----
function Ayuda_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Ayuda (see GCBO)
% -----
function Lista_ayuda_Callback(hObject, eventdata, handles)
Ayuda
% -----
function Acerca_de_Callback(hObject, eventdata, handles)
Acerca_de
% -----
function OKUMURA_HATA_Callback(hObject, eventdata, handles)
OKUMURA_HATA
close(gcbf)
% -----
function NLOS_Callback(hObject, eventdata, handles)
NLOS
close(gcbf)
% -----
function LOS_Callback(hObject, eventdata, handles)
LOS
close(gcbf)

```

Nota: Este es un extracto de la programación de los elementos utilizados en la interfaz “SIMULADOR_LTE”, el código completo se lo puede encontrar en el Anexo VI.

3.7.2. Menú Principal

Interfaz “Menú Principal” es una interfaz posterior a la presentación y su principal función es direccionar al usuario de esta simulación hacia las diferentes categorías del programa de acuerdo a como se desee estudiar el canal inalámbrico, esta interfaz se la puede observar en la Figura 3.9.

En la Tabla 3.4 se describen los componentes utilizados en la interfaz “Menú Principal”.

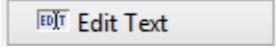
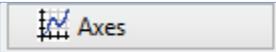
Elemento	Icono	Utilización
btn_ok_ha		Se utiliza para programar el enlace de la interfaz de Okumura-Hata
btn_ric		Se utiliza para programar el enlace de la interfaz de Desvanecimiento Rayleigh
btn_ray		Se utiliza para programar el enlace de la interfaz de Desvanecimiento Rician
btn_salir		Se utiliza para programar el botón de salida
btn_volver		Se utiliza para programar el botón de regreso al menú anterior
edit_text		Se utiliza para mostrar el texto en la interfaz
Imagen		Se utiliza para mostrar el logo de la interfaz

Tabla 3.4: Botones utilizados en Menu_Principal

Aparte de los elementos descritos en la Tabla 3.4, se programaron algunos submenús y herramientas que ayudan al usuario final a movilizarse entre interfaces.

En la Figura 3.9 se puede ver la interfaz “Menú Principal”, que consta de 3 botones en el centro los mismos que direccionan a cada una de las Interfaces, que son la parte fundamental de toda la simulación.

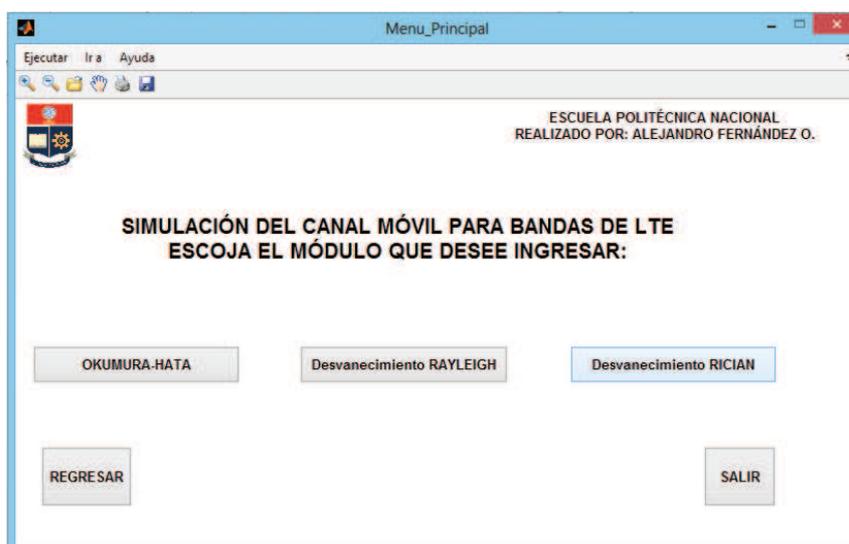


Figura 3.9: Interfaz Menu_Principal

Código Fuente de los elementos de la interfaz gráfica:

```

% --- Programación del logo utilizado en la Interfaz Menú Principal
function Menu_Principal_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
axes(handles.axes1)
fondo = imread('ESCUDO.jpg');
axis off;
imshow(fondo);

handles.output = hObject;

% --- Programación del btn_ok_ha (Direcciona al menú de OKUMURA-HATA)
function btn_ok_ha_Callback(hObject, eventdata, handles)
OKUMURA_HATA
close(gcf)

% --- Programación del btn_ray (Direcciona al menú de RAYLEIGH)
function btn_ray_Callback(hObject, eventdata, handles)
NLOS
close(gcf)

% --- Programación del btn_ric (Direcciona al menú de RICE)
function btn_ric_Callback(hObject, eventdata, handles)
LOS
close(gcf)

% --- Programación del btn_volver
function btn_volver_Callback(hObject, eventdata, handles)
SIMULADOR_LTE
close(gcf)

% --- Programación del btn_salir.
function btn_salir_Callback(hObject, eventdata, handles)
close(gcf)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%PROGRAMACIÓN DE SUB-MENUS%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% -----
function Ejecutar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% -----
function Ir_a_Callback(hObject, eventdata, handles)
% -----
function Ayuda_Callback(hObject, eventdata, handles)
% -----
function Lista_ayuda_Callback(hObject, eventdata, handles)
Ayuda
% -----
function Acerca_de_Callback(hObject, eventdata, handles)
Acerca_de
% -----
function Tesis_Callback(hObject, eventdata, handles)
winopen('TESIS_AF.docx')
% -----
function Presentacion_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to Presentacion (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
% -----
function Inicio_Callback(hObject, eventdata, handles)
SIMULADOR_LTE

```

```

close (gcbf)
% -----
function menu_prin_Callback(hObject, eventdata, handles)
Menu_Principal
% -----
function OKUMURA_HATA_Callback(hObject, eventdata, handles)
OKUMURA_HATA
close (gcbf)
% -----
function NLOS_Callback(hObject, eventdata, handles)
NLOS
close (gcbf)
% -----
function LOS_Callback(hObject, eventdata, handles)
LOS
close (gcbf)

```

Nota: Este es un extracto de la programación de los elementos utilizados en la interfaz “Menu_Principal”, el código completo se lo puede encontrar en el Anexo VI.

3.7.3. Okumura-Hata

En la interfaz Okumura-Hata se propone una simulación específica a este modelo de propagación antiguo pero muy utilizado para los sistemas celulares, como los fundamentos del mismo fueron desarrollados en el capítulo anterior. En la parte de la interfaz se aplicaron todas las fórmulas ya conocidas, donde se incluyó la parte de múltiples antenas para transmisión y recepción, lo que permite mejorar las potencias de transmisión y recepción, aparte de disminuir las pérdidas. En esta interfaz se pretende obtener la comparación entre los submodelos para verificar su variación en diferentes ambientes como son las ciudades grandes, ciudades pequeñas, ambientes no muy poblados y en ambientes rurales.

Para la mejor conceptualización de la interfaz Okumura-Hata se presenta la Figura 3.10, donde se muestra el diagrama de flujo de dicha interfaz.

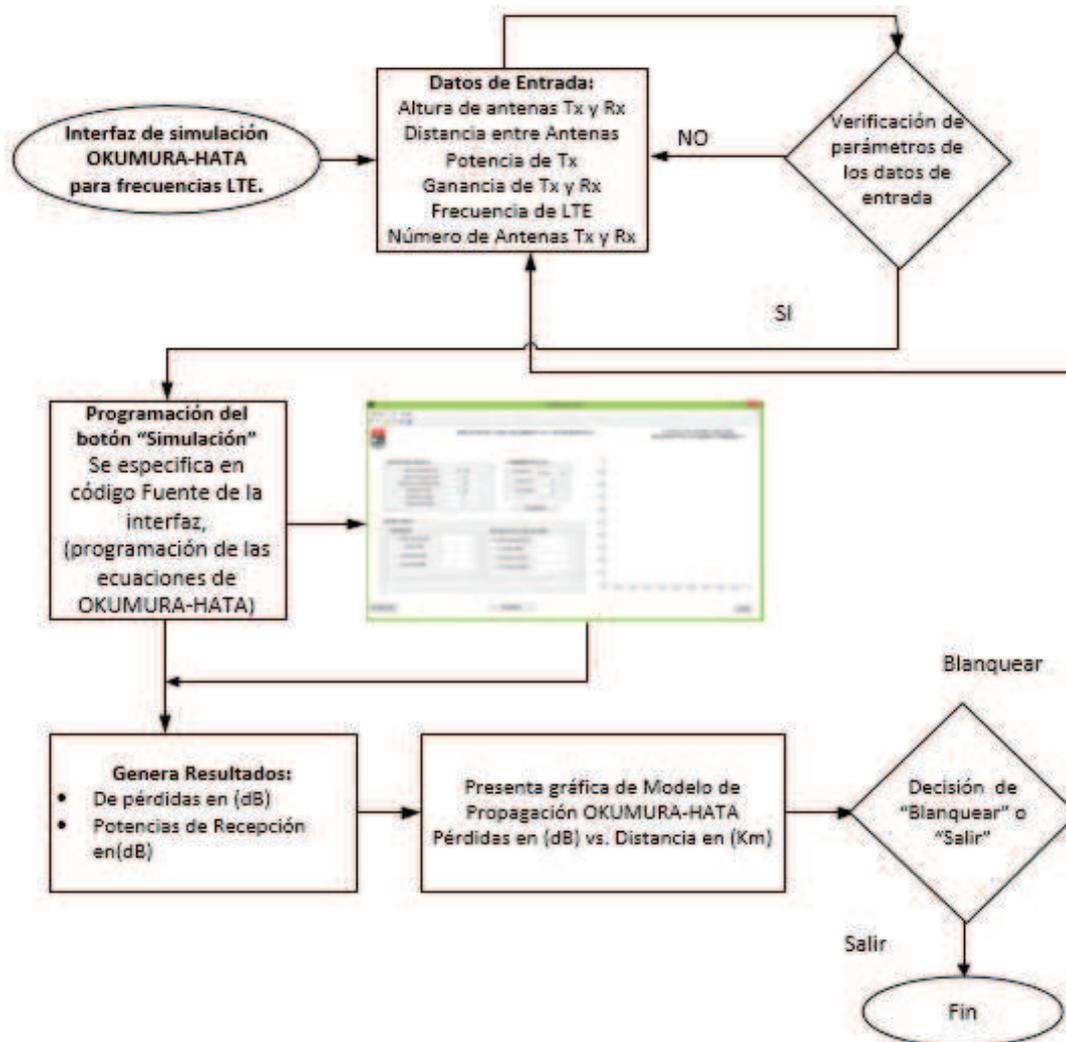
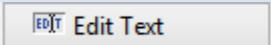
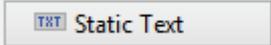


Figura 3.10: Diagrama de flujo interfaz Okumura-Hata [42]

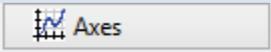
La interfaz Okumura-Hata se compone de los siguientes elementos descritos en la Tabla 3.5:

Elemento	Icono	Utilización
Antena_tx		Se utiliza para escoger el número de antenas transmisoras
Antena_rx		Se utiliza para escoger el número de antenas receptoras
Frecuencia		Se utiliza para escoger la frecuencia que trabajaría LTE o LTE-Advanced

Tabla 3.5: Botones utilizados en Okumura-Hata

Elemento	Icono	Utilización
alt_tx		Es utilizado para ingresar el parámetro de altura de las antenas transmisoras
alt_rx		Es utilizado para ingresar el parámetro de altura de las antenas receptoras
Distancia		Es utilizado para ingresar el parámetro de distancia del enlace
d_ptx		Es utilizado para ingresar el parámetro de potencia en dBw
d_gtx		Es utilizado para ingresar el parámetro de ganancia en transmisión
d_grx		Es utilizado para ingresar el parámetro de ganancia en recepción
urb_g		Indica el valor de pérdidas en una ciudad grande
Urb		Indica el valor de pérdidas en una ciudad pequeña
Surb		Indica el valor de pérdidas en una ciudad no muy poblada
Rural		Indica el valor de pérdidas en un ambiente rural
p_urb_g		Indica el valor de potencia de recepción en una ciudad grande
p_urb		Indica el valor de potencia de recepción en una ciudad normal
p_surb		Indica el valor de potencia de recepción en una ciudad no muy poblada
p_rural		Indica el valor de potencia de recepción en un ambiente rural

(Continuación) Tabla 3.5: Botones utilizados en Okumura-Hata

Elemento	Icono	Utilización
btn_regresar		Se utiliza para programar el botón de regreso al menú anterior
btn_blanquear		Se utiliza para programar el botón de limpiado de valores para ejecutar otra vez el programa si se deseara
btn_salir		Se utiliza para programar el botón de salida
btn_simulacion		Es el botón más importante del programa se utiliza para realizar todas las operaciones al presionar este objeto.
axes1		Se utiliza para mostrar el logo de la interfaz
axes2		Se utiliza para mostrar modelo de propagación Okumura-Hata en sus diferentes ambientes

(Continuación) Tabla 3.5: Botones utilizados en Okumura-Hata

Aparte de los elementos descritos en la Tabla 3.5, se incluyen algunos submenús y herramientas que ayudan al usuario final a movilizarse entre pantallas.

En la Figura 3.11 se puede observar la interfaz “Okumura-Hata”, lista para introducir los datos requeridos para su funcionamiento.

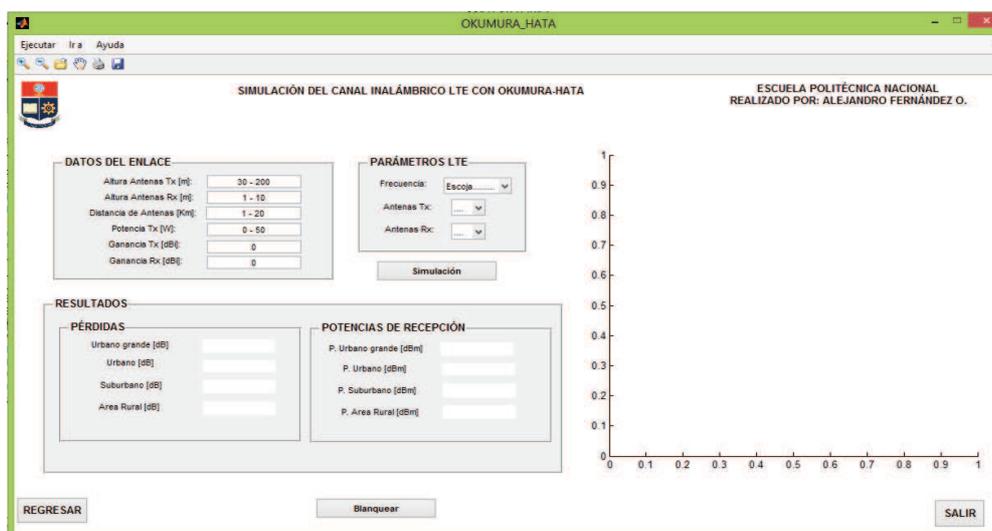


Figura 3.11: Interfaz Okumura-Hata

En el código fuente se puede observar la forma del programa, como se indicó en el diagrama de flujo, además de verificar las ecuaciones utilizadas para “Okumura-Hata” programadas en el botón simulación.

Código Fuente de los elementos de la interfaz gráfica Okumura-Hata:

```
% --- Programación del logo utilizado en la interfaz OKUMURA_HATA.
function OKUMURA_HATA_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
axes(handles.axes1)
fondo = imread('ESCUDO.jpg');
axis off;
imshow(fondo);

handles.output = hObject;
% --- Programación del btn_regresar.
function btn_regresar_Callback(hObject, eventdata, handles)
Menu_Principal
close(gcf)
% --- Programación del btn_blanquear.
function btn_blanquear_Callback(hObject, eventdata, handles)

set(handles.alt_tx, 'String', '30 - 200');
set(handles.alt_rx, 'String', '3 - 10');
set(handles.distancia, 'String', '1 - 20');
set(handles.d_ptx, 'String', '0');
set(handles.d_gtx, 'String', '0');
set(handles.d_grx, 'String', '0');
set(handles.urb, 'String', ' ');
set(handles.urb_g, 'String', ' ');
set(handles.surb, 'String', ' ');
set(handles.rural, 'String', ' ');
set(handles.p_urb, 'String', ' ');
set(handles.p_urb_g, 'String', ' ');
set(handles.p_surb, 'String', ' ');
set(handles.p_rural, 'String', ' ');
set(handles.Antena_tx, 'value', 1);
set(handles.Antena_rx, 'value', 1);
set(handles.Frecuencia, 'value', 1);
axes(handles.axes2)
plot([0 1], [0 1], 'w-');
% --- Programación del btn_salir.
function btn_salir_Callback(hObject, eventdata, handles)
close(gcf)
% --- Programación del btn_simulacion.
function btn_simulacion_Callback(hObject, eventdata, handles)
% Declaración de variables
ht = str2double(get(handles.alt_tx, 'String'));
hm = str2double(get(handles.alt_rx, 'String'));
d = str2double(get(handles.distancia, 'String'));
ptx = str2double(get(handles.d_ptx, 'String'));
gtx = str2double(get(handles.d_gtx, 'String'));
grx = str2double(get(handles.d_grx, 'String'));
%Delimitación de valores
if isfinite([ht, hm, d, ptx, gtx, grx])
```

```

if (ht>=30) && (ht<=200) && (hm>=0) && (hm<=10) && (d>=1) && (d<=100) &&
(ptx>=0) && (ptx<=50) && (gtx>=0) && (gtx<=100)&& (grx>=0) && (grx<=100)
% Menú de valores fijos
% Número de antenas transmisión
antenatx = get(handles.Antena_tx, 'value');
switch antenatx
    case 1
        return;
    case 2
        tx=1;
    case 3
        tx=2;
    case 4
        tx=3;
    case 5
        tx=4;
    case 6
        tx=6;
    case 7
        tx=8;
end

% Número de antenas recepción
antenarx = get(handles.Antena_rx, 'value');
switch antenarx
    case 1
        return;
    case 2
        rx=1;
    case 3
        rx=2;
    case 4
        rx=3;
    case 5
        rx=4;
    case 6
        rx=6;
    case 7
        rx=8;
end

% Frecuencia seleccionada
Frequency = get(handles.Frecuencia, 'value');
switch Frequency
    case 1
        return;
    case 2
        f=700;
    case 3
        f=850;
    case 4
        f=1700;
    case 5
        f=1900;
    case 6
        f=2100;
end
end
% Fórmula de Modelo Okumura-Hata
L50 = 69.55 + 26.16*log10(f) + (44.9 - 6.55*log10(ht))*log10(d) -
13.82*log10(ht);

```

```

%                               Factores de correccion
% Factor de corrección en (dB) de la altura de la antena para ciudades
grandes (cg)
    if (f>150) && (f<=200)
        cg = 8.29*(log10(1.54*hm))^2 - 1.1;
    elseif (f>200) && (f<400)
        cg = 0;
    elseif (f>=400)
        cg = 3.2*(log10(11.75*hm))^2 - 4.97;
    if f>1500
        L50 = L50+ 3;
    end
end
% Factor de corrección en (dB) de la altura de la antena para ciudades
pequeñas (cp)
cp = (1.1*log10(f) - 0.7)*hm - (1.56*log10(f) - 0.8);
%Factor de corrección en (dB) para areas suburbanas (as)
as = 2*(log10(f/28))^2 + 5.4;
%Factor de corrección en (dB) para areas abiertas (aa)
aa = 4.78*(log10(f))^2 - 18.33*log10(f) + 40.94;
%                               Modelo de propagación Okumura-Hata para diferentes áreas
% modelo de propagación Okumura-Hata para ciudades grandes (MOK_cg)
MOK_cg = L50 - cg;
% modelo de propagación Okumura-Hata para ciudades medianas y pequeñas
(MOK_cp)
MOK_cp = L50 - cp;
% modelo de propagación Okumura-Hata para áreas suburbanas (MOK_as)
MOK_as = L50 - as;
% modelo de propagación Okumura-Hata para áreas abiertas (MOK_aa)
MOK_aa = L50 - aa;
% Potencias de recepción
p = (10*log10 (ptx)) + (10*log10 (tx)) + (10*log10 (rx)) + gtx + grx +
30;
% Potencia de recepción en ciudades grandes (pr_cg)
pr_cg = p - MOK_cg;
% Potencia de recepción en ciudades pequeñas (pr_cp)
pr_cp = p - MOK_cp;
% Potencia de recepción en áreas suburbanas (pr_as)
pr_as = p - MOK_as;
% Potencia de recepción en áreas abiertas (pr_aa)
pr_aa = p - MOK_aa;
% Display de los vaores obtenidos
set(handles.urb_g, 'String',MOK_cg);
set(handles.urb, 'String',MOK_cp);
set(handles.surb, 'String',MOK_as);
set(handles.rural, 'String',MOK_aa);
set(handles.p_urb_g, 'String',pr_cg);
set(handles.p_urb, 'String',pr_cp);
set(handles.p_surb, 'String',pr_as);
set(handles.p_rural, 'String',pr_aa);
% Graficación de las pérdidas vs la distancia
d1 = 1:0.01:d;
n = length(d1);
Lb = 69.55 + 26.16*log10(f) - 13.82*log10(ht);
if f>1500
Lb = Lb + 3;
end
% Pérdidas de potencias para graficación
Lbcg = Lb - cg;
Lbcp = Lb - cp;

```

```

Lbas = Lb - as;
Lbaa = Lb - aa;
% Proceso de iteración
for i = 1:n
    Lbd = (44.9 - 6.55*log10(ht))*log10(d1(i));
    Lb_cg(i) = Lbcg + Lbd;
    Lb_cp(i) = Lbcg + Lbd;
    Lb_as(i) = Lbas + Lbd;
    Lb_aa(i) = Lbaa + Lbd;
end
% Comandos para graficación distancia vs pérdidas
axes(handles.axes2)
plot(d1,Lb_cg,d1,Lb_cp,d1,Lb_as,d1,Lb_aa)
xlabel('Distancias en (Km)');
ylabel('Pérdidas en (dB)');
grid
title('Modelo de Propagación Okumura-Hata')
legend('Ciudad Grande','Ciudad Pequeña ','Área Suburbana','Área
Abierta','Location','NorthWest')
else
    errordlg({'Algún parámetro se encuentra errado','Revise los valores
ingresados y', 'vuelva a intentarlo'},'Mensaje de Error')
end
else
    errordlg({'Algún parámetro se encuentra errado','Revise los valores
ingresados y', 'vuelva a intentarlo'},'Mensaje de Error')
end
end

```

Nota: Este es un extracto de la programación de los elementos utilizados en la interfaz “OKUMURA_HATA”, el código completo se lo puede encontrar en el Anexos VI.

3.7.4. NLOS (Distribución Rayleigh)

En la interfaz NLOS (*Non Line Of Sight*) sin línea de vista, se obtiene el cálculo de la eficiencia, velocidad de la trasmisión, margen de desvanecimiento, rapidez de cruce de nivel (LCR), ancho de banda coherente y tiempo coherente, lo cual proporciona una idea clara y concisa del comportamiento de la transmisión del sistema celular LTE y LTE-*Advanced* por medio de un canal inalámbrico, donde no se obtiene una línea de vista definida, este modelamiento se lo realiza con la distribución de Rayleigh y es bastante utilizado en ambientes abiertos con obstáculos que dificultan el paso de la señal.

A continuación en la Figura 3.12, se muestra el diagrama de flujo de la interfaz NLOS.

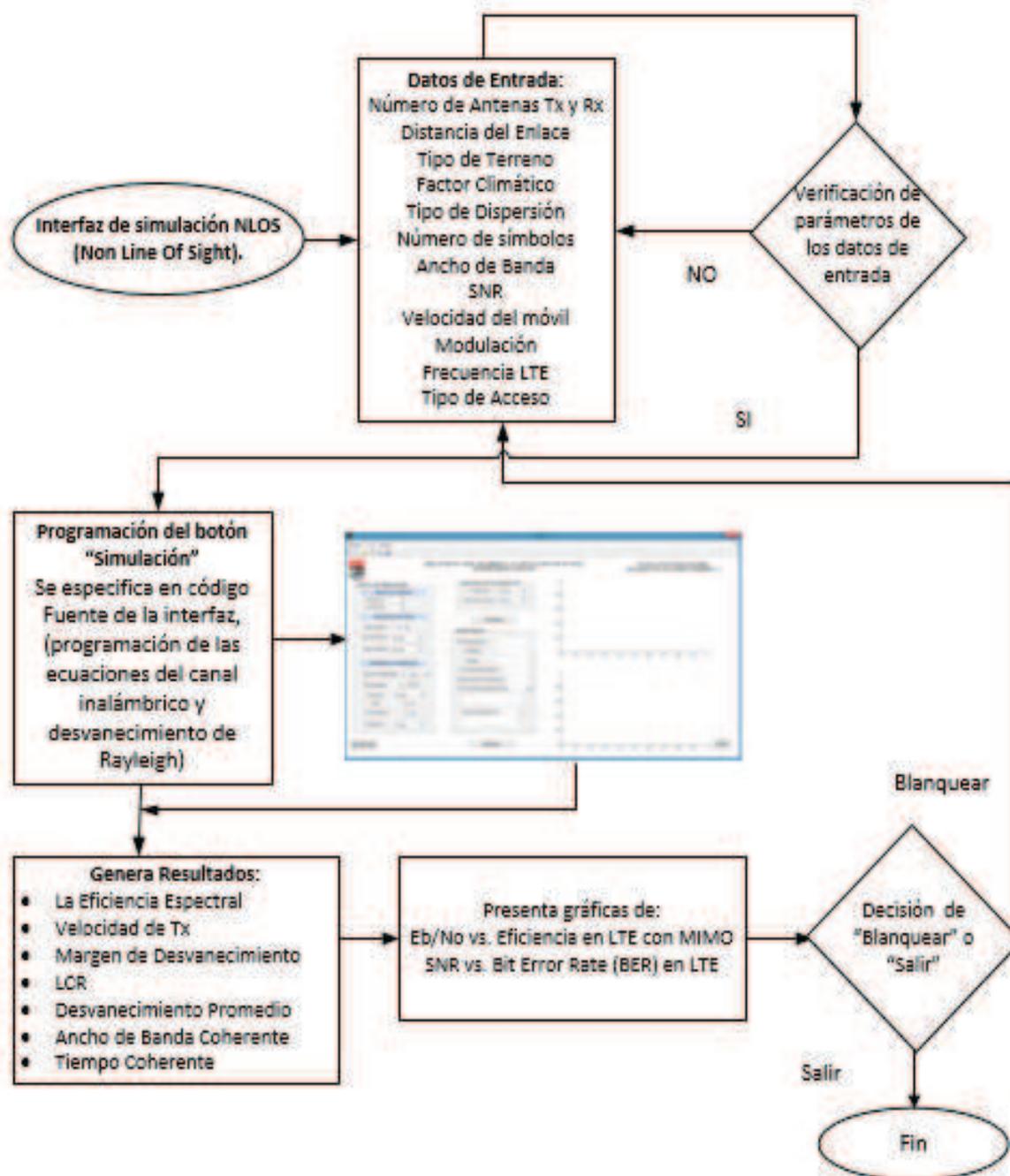


Figura 3.12: Diagrama de flujo interfaz NLOS (Non Line Of Sight) ^[42]

La interfaz NLOS se compone de los siguientes elementos, descritos en la Tabla 3.6.

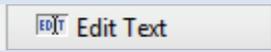
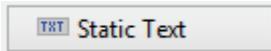
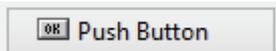
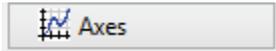
Elemento	Icono	Utilización
Antena_tx		Se utiliza para escoger el número de antenas transmisoras
Antena_rx		Se utiliza para escoger el número de antenas receptoras
tipo_terreno		Se utiliza para escoger el tipo de terreno
Factor_climatico		Se utiliza para escoger el factor climático
btn_BW		Se utiliza para escoger el ancho de banda que funciona LTE y LTE- <i>Advanced</i>
Modulación		Se utiliza para escoger tipo de modulación aceptadas por LTE y LTE- <i>Advanced</i>
Frecuencia		Se utiliza para escoger la frecuencia que trabajaría LTE o LTE- <i>Advanced</i>
btn_TA		Se utiliza para escoger la técnica de acceso
Distancia		Es utilizado para ingresar el parámetro de distancia del enlace
TD		Es utilizado para ingresar el parámetro tiempo de dispersión.
Simbolos		Es utilizado para ingresar el número de símbolos que se desean transmitir
SNR		Es utilizado para ingresar el parámetro de relación señal a ruido
Vm		Es utilizado para ingresar la velocidad con que se mueve el usuario
Efic		Indica el valor de eficiencia obtenido
Vtx		Indica el valor de velocidad de transmisión obtenido
FM		Indica el valor de fading margen obtenido
LCR		Indica el valor de level crossing rate obtenido

Tabla 3.6: Botones utilizados en NLOS (*Non Line Of Sight*)

Elemento	Icono	Utilización
DP		Indica el valor de desvanecimiento promedio obtenido
Bc		Indica el valor de ancho de banda coherente obtenido
comp_Bc		Indica que tipo de fading es de acuerdo al valor obtenido
Tc		Indica el valor de tiempo coherente obtenido
comp_Tc		Indica que tipo de fading es de acuerdo al valor obtenido
btn_regresar		Se utiliza para programar el botón de regreso al menú anterior
btn_blanquear		Se utiliza para programar el botón de limpiado de valores para ejecutar otra vez el programa si se deseara
btn_salir		Se utiliza para programar el botón de salida
btn_simulacion		Es el botón más importante del programa se utiliza para realizar todas las operaciones al presionar este objeto.
axes1		Se utiliza para mostrar el logo de la interfaz
axes2		Se utiliza para mostrar el resultado de SNR vs BER
axes3		Se utiliza para mostrar el resultado de EbNo vs Eficiencia

(Continuación) Tabla 3.6: Botones utilizados en NLOS (*Non Line Of Sight*)

Aparte de los elementos descritos en la Tabla 3.6, se incluyen algunos submenús y herramientas que ayudan al usuario final a movilizarse entre interfaces.

En la Figura 3.13, se muestra la interfaz NLOS lista para su utilización, siempre que los datos ingresados estén dentro de los parámetros.

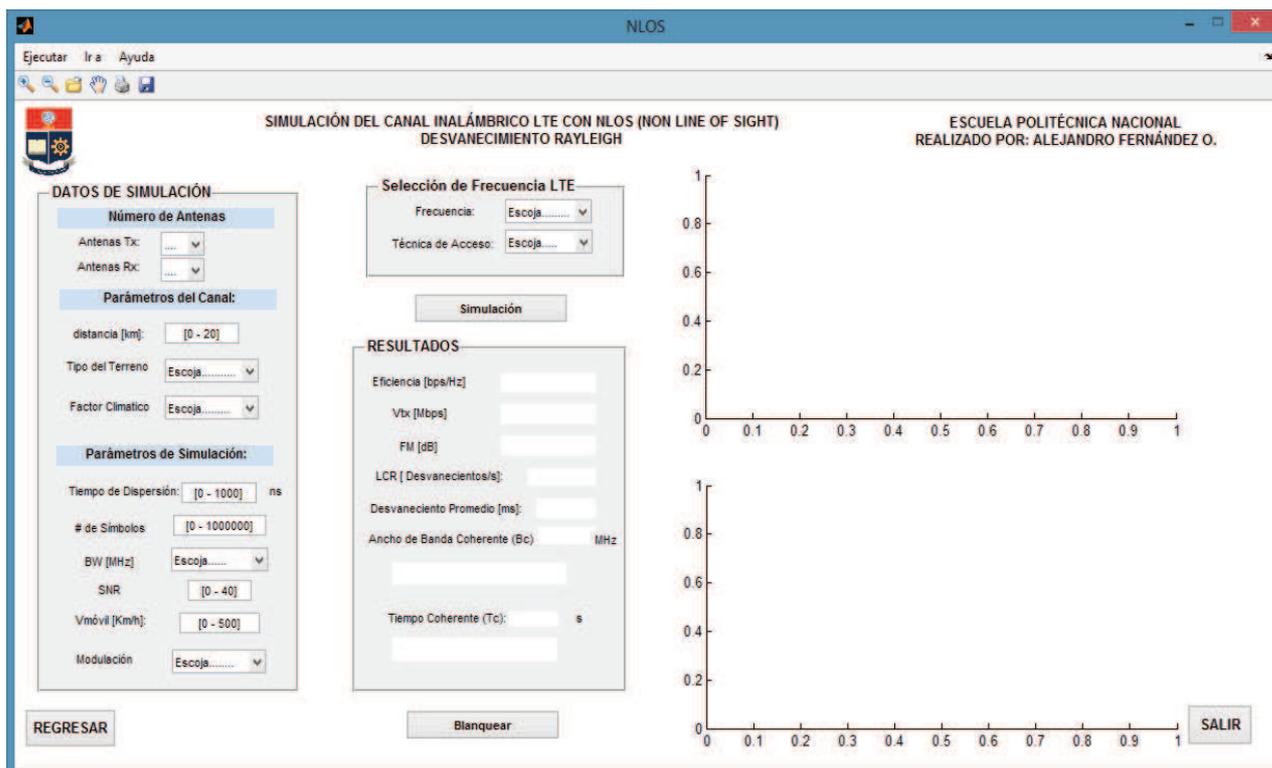


Figura 3.13: Interfaz NLOS (Non Line Of Sight)

Una vez indicado y explicado el diagrama de flujo de la interfaz NLOS, se procede a presentar el código fuente donde se puede verificar la estructura del programa y en el botón simulación se presenta la forma de programación del canal inalámbrico con el desvanecimiento de Rayleigh, además de las fórmulas de capacidad del sistema MIMO y la forma que se programaron las diferentes modulaciones utilizadas por LTE.

Código Fuente de los elementos de la interfaz NLOS:

```
% --- Programación del logo utilizado en la interfaz NLOS.
function NLOS_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
axes(handles.axes1)
fondo = imread('ESCUDO.jpg');
axis off;
imshow(fondo);

handles.output = hObject;

% --- Programación del btn_regresar.
function btn_regresar_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```

Menu_Principal
close(gcf)

% --- Programación del btn_salir.
function btn_salir_Callback(hObject, eventdata, handles)
close(gcf)

% --- Programación del btn_simulación.
function btn_simulacion_Callback(hObject, eventdata, handles)
td = str2double(get(handles.TD, 'String'));
VM = str2double(get(handles.Vm, 'String'));
d = str2double(get(handles.distancia, 'String'));
nsi = str2double(get(handles.Simbolos, 'String'));
snr = str2double(get(handles.SNR, 'String'));
if isfinite([td, VM, d, nsi, snr])
if (td>=0) && (td<=1000) && (VM>=0) && (VM<=500) && (d>=0) && (d<=20) &&
(nsi>=0) && (nsi<=1000000) && (snr>=0) && (snr<=40)

% Número de antenas transmisión
antenatx = get(handles.Antena_tx, 'value');
switch antenatx
    case 1
        return;
    case 2
        tx=1;
    case 3
        tx=2;
    case 4
        tx=3;
    case 5
        tx=4;
    case 6
        tx=6;
    case 7
        tx=8;
end

% Número de antenas recepción
antenarx = get(handles.Antena_rx, 'value');
switch antenarx
    case 1
        return;
    case 2
        rx=1;
    case 3
        rx=2;
    case 4
        rx=3;
    case 5
        rx=4;
    case 6
        rx=6;
    case 7
        rx=8;
end

% Frecuencia seleccionada
Frecuency = get(handles.Frecuencia, 'value');
switch Frecuency

```

```

    case 1
        return;
    case 2
        f=700;
    case 3
        f=850;
    case 4
        f=1700;
    case 5
        f=1900;
    case 6
        f=2100;
end

% Técnica de acceso al medio
tecacc = get(handles.btn_TA, 'value');
switch tecacc
    case 1
        return;
    case 2
        ta=66.67; % Valor de duración de símbolo CP en SC-FDMA
    case 3
        ta=72; % Valor de duración de símbolo CP en OFDMA
end

% Tipo del terreno
terreno = get(handles.tipo_terreno, 'value');
switch terreno
    case 1
        return;
    case 2
        terr=4;
    case 3
        terr=3;
    case 4
        terr=2;
    case 5
        terr=1;
    case 6
        terr=0.25;
end

% Ancho de banda
AB = get(handles.btn_BW, 'value');
switch AB
    case 1
        return;
    case 2
        bw=1.4;
    case 3
        bw=3;
    case 4
        bw=5;
    case 5
        bw=10;
    case 6
        bw=15;
    case 7

```

```

        bw=20;
    case 8
        bw=40;
    case 9
        bw=100;
end

% Factor climático
clima = get(handles.Factor_climatico,'value');
switch clima
    case 1
        return;
    case 2
        cli=1;
    case 3
        cli=0.5;
    case 4
        cli=0.25;
    case 5
        cli=0.125;
end

% Modulación
mod = get(handles.Moulacion,'value');
switch mod
    case 1
        return;
    case 2

        % programación de modulación QPSK

        SNRdB=0:2:snr;                %SNR en dB
        SNRR=10.^(SNRdB/10);          %SNR en escalares
        bl=nsi;                        %No. de bits de transmisión
        ber=zeros(1,length(SNRdB)); % Programación del BER
        x1=(2*floor(2*rand(1,bl)))-1;
        x2=(2*floor(2*rand(1,bl)))-1;
        x=x1+1i*x2;

        % Desvanecimiento de Rayleigh en el canal inalámbrico
        parfor ka=1:length(SNRR)

y=raylrnd(1/sqrt(2),1,bl).*(sqrt(SNRR(ka))*x1)+randn(1,bl)+1i*(raylrnd(1/
sqrt(2),1,bl).*(sqrt(SNRR(ka))*x2)+randn(1,bl));

ber(ka)=length(find((real(y).*x1)<0))+length(find((imag(y).*x2)<0));
end
ber=ber/bl;
p=0.5*(1-(sqrt(SNRR./(2+SNRR))));
axes(handles.axes3)
semilogy(SNRdB,ber,'g-', 'linewidth',2.0);
hold on
axes(handles.axes3)
semilogy(SNRdB,(2*p-p.^2),'r-', 'linewidth',2.0);
xlabel('SNR(dB)');
ylabel('Bit Error Rate, (BER)');
title('SNR vs Bit Error Rate (BER) en LTE');
legend('Resultado de la Simulación','Resultado Teórico');
hold off

```

```

        grid

    case 3

        % programación de modulación 16-QAM
M=16;
EbNodB = [0:2:snr];
EbNolin = 10.^(EbNodB/10) ;
Pe_sim=[];
for i = 1:((snr/2)+1),
    Pe_sim=[Pe_sim QAM_rayleigh(M, EbNodB(i))];
end
% Ref: Wireless Communication, A. Goldsmith (27)
% programación de los gráficos
axes(handles.axes3)
semilogy(EbNodB,Pe_sim,'g-','linewidth',2.0);
hold on

if(M==4)
    a=1;
else
    a=4/log2(M);
end
b=3*log2(M)/(M-1);
Pe=[];
for i = 1:((snr/2)+1),
    Pe= [Pe 0.5*a*(1-sqrt(0.5*b*EbNolin(i)/(1+0.5*b*EbNolin(i))))];
end
axes(handles.axes3)
semilogy(EbNodB,Pe,'r-','linewidth',2.0);
xlabel('SNR(dB)');
ylabel('Bit Error Rate, (BER)');
title('SNR vs Bit Error Rate (BER) en LTE');
legend('Resultado de la Simulación','Resultado Teórico');
hold off
grid

    case 4

        % programación de modulación 64-QAM
M=64;
EbNodB = [0:2:snr];
EbNolin = 10.^(EbNodB/10) ;
Pe_sim=[];
for i = 1:((snr/2)+1),
    Pe_sim=[Pe_sim QAM_rayleigh(M, EbNodB(i))];
end
% Ref: Wireless Communication, A. Goldsmith (27)
% programación de los gráficos
axes(handles.axes3)
semilogy(EbNodB,Pe_sim,'g-','linewidth',2.0);
hold on

if(M==4)
    a=1;
else

```

```

        a=4/log2(M);
end
b=3*log2(M)/(M-1);
Pe=[];
for i = 1:((snr/2)+1),
    Pe= [Pe 0.5*a*(1-sqrt(0.5*b*EbNolin(i)/(1+0.5*b*EbNolin(i))))];
end
axes(handles.axes3)
semilogy(EbNodB,Pe,'r-','linewidth',2.0);
xlabel('SNR(dB)');
ylabel('Bit Error Rate, (BER)');
title('SNR vs Bit Error Rate (BER) en LTE');
legend('Resultado de la Simulación','Resultado Teórico');
hold off
grid

end

% Capacidad de un canal mimo
for i=1:10;
    snr=snr+2;
for j=1:10;
    r1=normrnd(1*cos(randn(1)),1,[tx,rx]);
    r2=normrnd(1*sin(randn(1)),1,[tx,rx]);
    h = 1/sqrt(2)*sqrt(r1.^2+r2.^2);
c(j)=((log(det(eye(tx)+((10^(snr/10))/(tx)).*(h*(h')))))/log(2))/ta);
%Factor determinante para Up/down load
end
yy(i)=mean(c);
xx(i)=snr;
end

axes(handles.axes2)
plot([0 xx],[0 yy],':','LineWidth',1.5);
xlabel('Eb/No(dB)');
ylabel('Eficiencia (bps/Hz)');
grid on
hold off
title('Eb/No vs Eficiencia en LTE con MIMO')

vtx = c(j).*bw;
fm = (30*log10(d)) + (10*log10(6 * cli * terr *(f/1000))) - (10*log10
((0.00001*d)/400)) - 70;
Vp = ((3*(10^8))/1.0003);
lam = (Vp/(f*(10^6)));
fd = ((VM*(1000/3600))/lam);
ro = 1;
lcr = (sqrt(2 * pi) * fd * ro * (exp(-(ro^2))));
dp = ((exp(-(ro^2))/(ro * fd))*(1/sqrt(2 * pi)));
TC = (1/(2 * pi * fd));
Ts = ((1/vtx)*(10^(-6)));

    if Ts < TC
        set(handles.comp_Tc,'String',' Ts << Tc => SLOW FADING ');
    else
        set(handles.comp_Tc,'String',' Ts >> Tc => FAST FADING ');
    end
end
Td = (td * 10^(-9));
BC = (1/(2 * pi * Td));

```

```

bc = (BC *(10^(-6)));
BW = ( bw * (10^6));
    if BC > BW
        set(handles.comp_Bc,'String',' Bc > Bw => FLAT FADING ');
    else
        set(handles.comp_Bc,'String',' Bc < Bw => SELECTIVE FADING ');
    end
set(handles.Vtx,'String',vtx);
set(handles.Efic,'String',c(j));
set(handles.FM,'String',fm);
set(handles.LCR,'String',lcr);
set(handles.DP,'String',dp);
set(handles.Bc,'String',bc);
set(handles.Tc,'String',TC);
else
    errordlg({'Algún parametro se encuentra errado','Revise los valores
    ingresados y', 'vuelva a intentarlo'},'Mensaje de Error')
end
else
    errordlg({'Algún parametro se encuentra errado','Revise los valores
    ingresados y', 'vuelva a intentarlo'},'Mensaje de Error')
end

% --- Programación del btn_blanquear.
function btn_blanquear_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.TD,'String',[0 - 1000]);
set(handles.Vm,'String',[0 - 500]);
set(handles.distancia,'String',[0 - 20]);
set(handles.Simbolos,'String',[0 - 1000000]);
set(handles.SNR,'String',[0 - 40]);
set(handles.Vtx,'String',' ');
set(handles.Efic,'String',' ');
set(handles.FM,'String',' ');
set(handles.LCR,'String',' ');
set(handles.DP,'String',' ');
set(handles.Bc,'String',' ');
set(handles.Tc,'String',' ');
set(handles.comp_Bc,'String',' ');
set(handles.comp_Tc,'String',' ');
set(handles.Antena_tx,'value',1);
set(handles.Antena_rx,'value',1);
set(handles.Frecuencia,'value',1);
set(handles.btn_TA,'value',1);
set(handles.tipo_terreno,'value',1);
set(handles.btn_BW,'value',1);
set(handles.Factor_climatico,'value',1);
set(handles.Moulacion,'value',1);
axes(handles.axes2)
plot([0 1],[0 1],'w-');
axes(handles.axes3)
plot([0 1],[0 1],'w-');

```

Nota: Este es un extracto de la programación de los elementos utilizados en la interfaz NLOS, el código completo se lo puede encontrar en el Anexo VI.

3.7.5. LOS (Distribución Rician / Rice)

En la interfaz LOS (*Line Of Sight*), para su modelamiento se utiliza la distribución Rician, con esta distribución se realiza la simulación en el canal inalámbrico con las frecuencias propias en las que se desarrolla LTE, con un sistema de múltiples antenas de transmisión y recepción denominado MIMO, esta simulación es utilizada cuando se tiene entornos con Línea de vista que, generalmente, son ambientes interiores, cerrados o ambientes abiertos con pocos obstáculos.

La interfaz LOS también calcula parámetros de eficiencia, velocidad de la transmisión, realiza cálculos de margen de desvanecimiento, rapidez de cruce de nivel (LCR), ancho de banda coherente y tiempo coherente, dando una idea completa de cómo se transmite la señal por medio de un sistema de comunicaciones inalámbrico, cuando existe línea de vista.

Para un mejor entendimiento de lo expuesto en los párrafos anteriores se muestra a continuación el diagrama de flujo de la interfaz LOS, en la Figura 3.14.

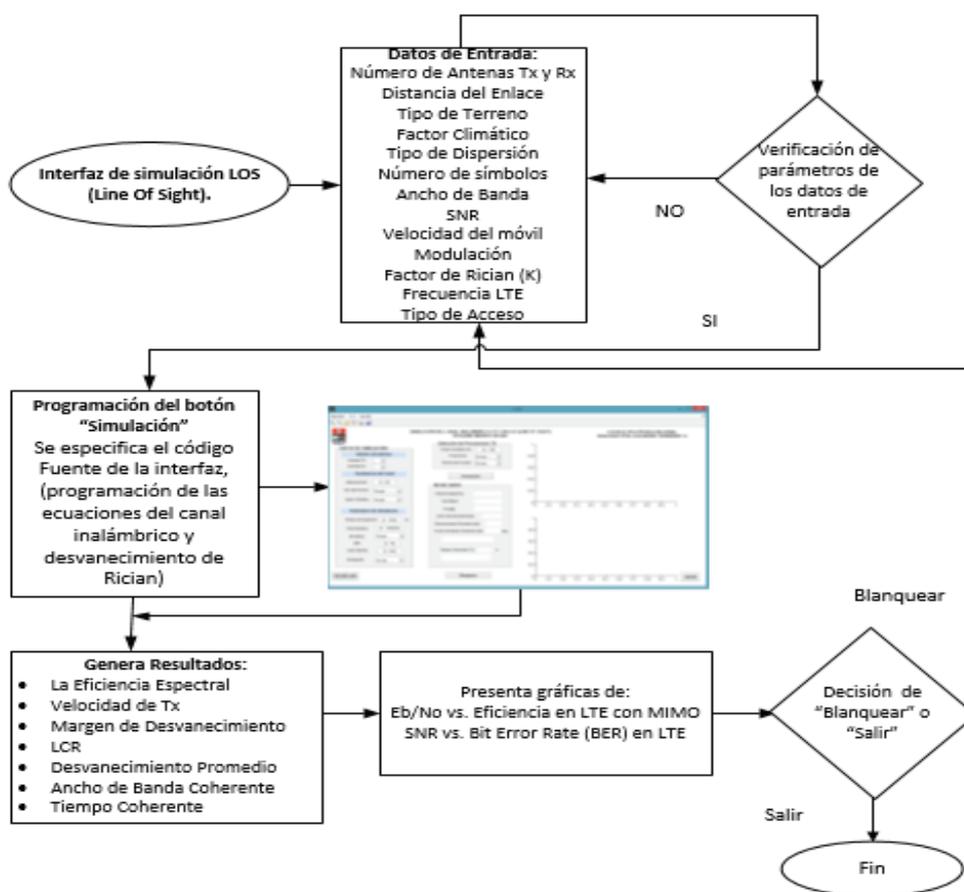


Figura 3.14: Diagrama de flujo interfaz LOS (Line Of Sight). [42]

La interfaz LOS se compone de los siguientes elementos, descritos en la Tabla 3.7:

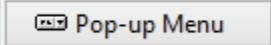
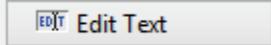
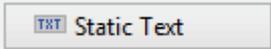
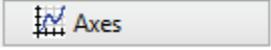
Elemento	Icono	Utilización
Antena_tx		Se utiliza para escoger el número de antenas transmisoras
Antena_rx		Se utiliza para escoger el número de antenas receptoras
tipo_terreno		Se utiliza para escoger el tipo de terreno
Factor_climatico		Se utiliza para escoger el factor climático
btn_BW		Se utiliza para escoger el ancho de banda que funciona LTE y LTE- <i>Advanced</i>
Modulación		Se utiliza para escoger tipo de modulación aceptadas por LTE y LTE- <i>Advanced</i>
Frecuencia		Se utiliza para escoger la frecuencia que trabajaría LTE o LTE- <i>Advanced</i>
btn_TA		Se utiliza para escoger la técnica de acceso
Distancia		
TD	Es utilizado para ingresar el parámetro tiempo de dispersión.	
Símbolos	Es utilizado para ingresar el número de símbolos que se desean transmitir	
SNR	Es utilizado para ingresar el parámetro de relación señal a ruido	
Vm	Es utilizado para ingresar la velocidad con que se mueve el usuario	
btn_k	Es utilizado para ingresar el factor de Rician / Rice	

Tabla 3.7: Botones utilizados en LOS (*Line Of Sight*)

Elemento	Icono	Utilización
Efic		Indica el valor de eficiencia obtenido
Vtx		Indica el valor de velocidad de transmisión obtenido
FM		Indica el valor de fading margin obtenido
LCR		Indica el valor de level crossing rate obtenido
DP		Indica el valor de desvanecimiento promedio obtenido
Bc		Indica el valor de ancho de banda coherente obtenido
comp_Bc		Indica que tipo de fading es de acuerdo al valor obtenido
Tc		Indica el valor de tiempo coherente obtenido
comp_Tc		Indica que tipo de fading es de acuerdo al valor obtenido
btn_regresar		
btn_blanquear	Se utiliza para programar el botón de limpiado de valores para ejecutar otra vez el programa si se deseara	
btn_salir	Se utiliza para programar el botón de salida	
btn_simulacion	Es el botón mas importante del programa se utiliza para realizar todas las operaciones al presionar este objeto.	
axes1		Se utiliza para mostrar el logo de la interfaz
axes2		Se utiliza para mostrar el resultado de SNR vs VER
axes3		Se utiliza para mostrar el resultado de EbNo vs Eficiencia

(Continuación) Tabla 3.7: Botones utilizados en LOS (*Line Of Sight*)

Aparte de los elementos descritos en la Tabla 3.7, se incluye algunos submenús y herramientas que ayudan al usuario final a movilizarse entre interfaces.

En la Figura 3.15, se muestra la interfaz LOS lista para su utilización, siempre que los datos ingresados estén dentro de los parámetros.

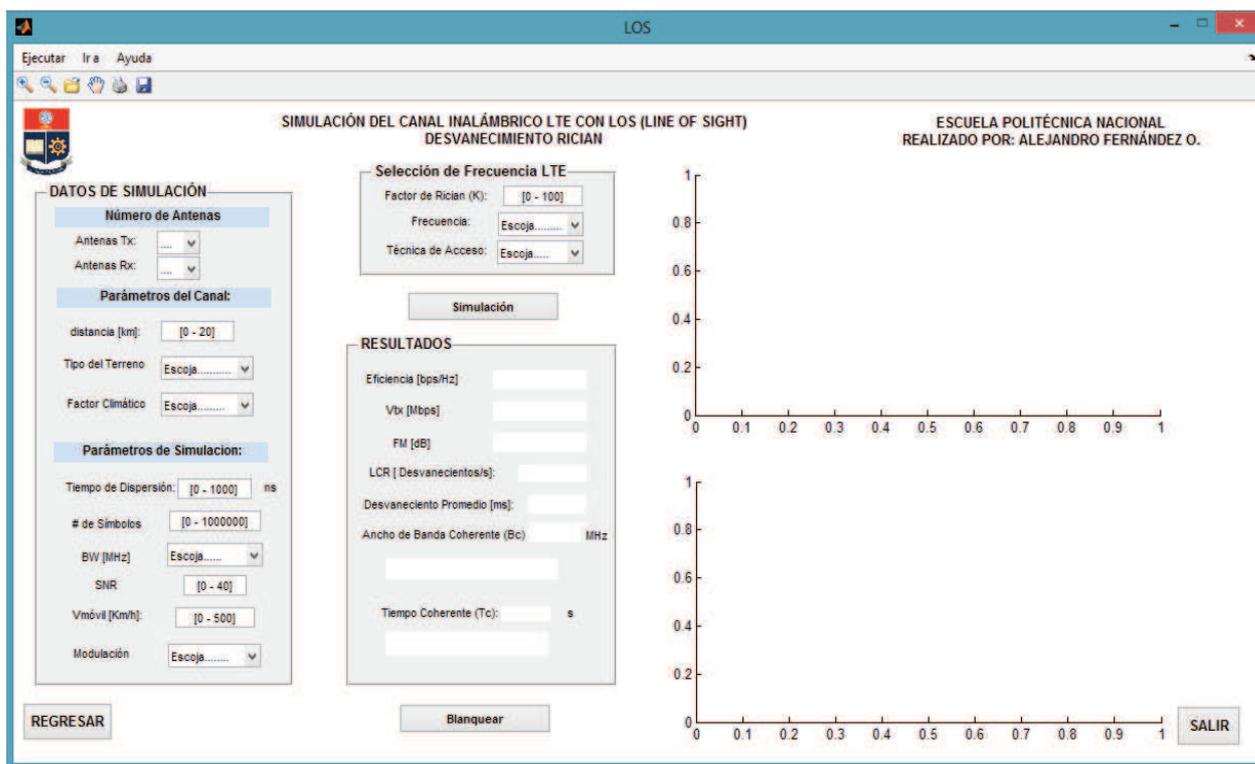


Figura 3.15: Interfaz LOS (Line Of Sight)

Ya indicada la estructura de la interfaz LOS en su diagrama de flujo en la Figura 3.14, se procede a presentar el código fuente, donde se puede verificar la programación entera de la interfaz. Entre los puntos más sobresalientes que se encuentra en el código del programa, está la formulación del canal inalámbrico con el desvanecimiento de Rician / Rice, las fórmulas de capacidad del sistema MIMO y la forma que se programó las diferentes modulaciones utilizadas por LTE.

Código Fuente de los elementos de la interfaz gráfica:

```
% --- Programación de logo utilizado en la interfaz LOS.
function LOS_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
axes(handles.axes1)
fondo = imread('ESCUDO.jpg');
axis off;
imshow(fondo);
```

```

handles.output = hObject;
% --- Programación del btn_regresar.
function btn_regresar_Callback(hObject, eventdata, handles)
Menu_Principal
close(gcf)
% ---Programación del btn_simulación.
function btn_simulacion_Callback(hObject, eventdata, handles)

td = str2double(get(handles.TD, 'String'));
VM = str2double(get(handles.Vm, 'String'));
kr = str2double(get(handles.btn_k, 'String'));
d = str2double(get(handles.distancia, 'String'));
nsi = str2double(get(handles.Simbolos, 'String'));
snr = str2double(get(handles.SNR, 'String'));
if isfinite([td, VM, d, nsi, snr, kr])
if (td>=0) && (td<=1000) && (VM>=0) && (VM<=500) && (d>=0) && (d<=20) &&
(nsi>=0) && (nsi<=1000000) && (snr>=0) && (snr<=40)&& (kr>=0) && (kr<=20)

% Número de antenas transmisión
antenatx = get(handles.Antena_tx, 'value');
switch antenatx
    case 1
        return;
    case 2
        tx=1;
    case 3
        tx=2;
    case 4
        tx=3;
    case 5
        tx=4;
    case 6
        tx=6;
    case 7
        tx=8;
end

% Número de antenas recepción
antenarx = get(handles.Antena_rx, 'value');
switch antenarx
    case 1
        return;
    case 2
        rx=1;
    case 3
        rx=2;
    case 4
        rx=3;
    case 5
        rx=4;
    case 6
        rx=6;
    case 7
        rx=8;
end

% Frecuencia seleccionada
Frecuency = get(handles.Frecuencia, 'value');

```

```

switch Frecuency
    case 1
        return;
    case 2
        f=700;
    case 3
        f=850;
    case 4
        f=1700;
    case 5
        f=1900;
    case 6
        f=2100;
end

% Técnica de acceso al medio
tecacc = get(handles.btn_TA, 'value');
switch tecacc
    case 1
        return;
    case 2
        ta=66.67; % Valor de duración de símbolo CP en SC-FDMA
    case 3
        ta=72;    % Valor de duración de símbolo CP en OFDMA
end

% Tipo del terreno
terreno = get(handles.tipo_terreno, 'value');
switch terreno
    case 1
        return;
    case 2
        terr=4;
    case 3
        terr=3;
    case 4
        terr=2;
    case 5
        terr=1;
    case 6
        terr=0.25;
end

% Ancho de banda
AB = get(handles.btn_BW, 'value');
switch AB
    case 1
        return;
    case 2
        bw=1.4;
    case 3
        bw=3;
    case 4
        bw=5;
    case 5
        bw=10;
    case 6
        bw=15;
    case 7

```

```

        bw=20;
    case 8
        bw=40;
    case 9
        bw=100;
end
% Factor climático
clima = get(handles.Factor_climatico,'value');
switch clima
    case 1
        return;
    case 2
        cli=1;
    case 3
        cli=0.5;
    case 4
        cli=0.25;
    case 5
        cli=0.125;
end
% Modulación
mod = get(handles.Moulacion,'value');
switch mod
    case 1
        return;
    case 2

        % programación de modulación QPSK

        SNRdB=0:2:snr; %SNR en dB
        SNRR=(10.^(SNRdB/10)); %SNR en escalares
        bl=nsi; %No. De bits de transmisión
        ber=zeros(1,length(SNRdB)); %Programación del BER
        x1=(2*floor(2*rand(1,bl)))-1;
        x2=(2*floor(2*rand(1,bl)))-1;
        x=x1+1i*x2;
        % Desvanecimiento de Rician /Rice en el canal inalámbrico
        % Factor de rice (Fr)
        Fr = SNRR/sqrt(1+kr);
        parfor ka=1:length(Fr)

y=raylrnd(1/sqrt(2),1,bl).*(sqrt(Fr(ka))*x1)+randn(1,bl)+1i*(raylrnd(1/sq
rt(2),1,bl).*(sqrt(Fr(ka))*x2)+randn(1,bl));

ber(ka)=length(find((real(y).*x1)<0))+length(find((imag(y).*x2)<0));
end
ber=ber/bl;
p=0.5*(1-(sqrt(Fr./(2+Fr))));
axes(handles.axes3)
semilogy(SNRdB,ber,'g-', 'linewidth',2.0);
hold on
axes(handles.axes3)
semilogy(SNRdB,(2*p-p.^2),'r-', 'linewidth',2.0);
xlabel('SNR(dB)');
ylabel('Bit Error Rate, (BER)');
title('SNR vs Bit Error Rate (BER) en LTE');
legend('Resultado de la Simulación','Resultado Teórico');
hold off
grid

```

```

case 3

    % programación de modulación 16-QAM
M=16;
EbNodB = [0:2:snr];
EbNolin = 10.^(EbNodB/10) ;
Pe_sim=[];
for i = 1:((snr/2)+1),
    Pe_sim=[Pe_sim QAM_rician(M,kr, EbNodB(i))];
end
% Ref: Wireless Communication, A. Goldsmith (27)
% programación de los gráficos
axes(handles.axes3)
semilogy(EbNodB,Pe_sim,'g-','linewidth',2.0);
hold on

if(M==4)
    a=1;
else
    a=4/log2(M);
end
b=3*log2(M)/(M-1);
Fr = (EbNolin/sqrt(1+kr));
Pe=[];
for i = 1:((snr/2)+1),
    Pe= [Pe 0.5*a*(1-sqrt(0.5*b*Fr(i)/((1+kr)+0.5*b*Fr(i))))];
end
axes(handles.axes3)
semilogy(EbNodB,Pe,'r-','linewidth',2.0);
xlabel('SNR(dB)');
ylabel('Bit Error Rate, (BER)');
title('SNR vs Bit Error Rate (BER) en LTE');
legend('Resultado de la Simulación','Resultado Teórico');
hold off
grid

case 4
    % programación de modulación 64-QAM
M=64;
EbNodB = [0:2:snr];
EbNolin = 10.^(EbNodB/10) ;
Pe_sim=[];
for i = 1:((snr/2)+1),
    Pe_sim=[Pe_sim QAM_rician(M,kr, EbNodB(i))];
end
% Ref: Wireless Communication, A. Goldsmith (27)
% programación de los gráficos
axes(handles.axes3)
semilogy(EbNodB,Pe_sim,'g-','linewidth',2.0);
hold on

if(M==4)
    a=1;
else
    a=4/log2(M);
end
b=3*log2(M)/(M-1);
Fr = (EbNolin/sqrt(1+kr));
Pe=[];

```

```

for i = 1:((snr/2)+1),
    Pe= [Pe 0.5*a*(1-sqrt(0.5*b*Fr(i)/(1+0.5*b*Fr(i))))];
end
% Ref: Wireless Communication, A. Goldsmith
axes(handles.axes3)
semilogy(EbNodB,Pe,'r-','linewidth',2.0);
xlabel('SNR(dB)');
ylabel('Bit Error Rate, (BER)');
title('SNR vs Bit Error Rate (BER) en LTE');
legend('Resultado de la Simulación','Resultado Teórico');
hold off
grid
end
% Capacidad de un canal mimo
for i=1:10;
    snr=snr+2;
for j=1:10;
    r1=normrnd(1*cos(randn(1)),1,[tx,rx]);
    r2=normrnd(1*sin(randn(1)),1,[tx,rx]);
    h = 1/sqrt(2)*sqrt(r1.^2+r2.^2);
c(j)=(log(det(eye(tx)+((10^(snr/10))/(tx)).*(h*(h'))))/log(2))/ta); %
Factor determinante para Up/down load
end
    yy(i)=mean(c);
    xx(i)=snr;
end
axes(handles.axes2)
plot([0 xx],[0 yy],':','LineWidth',1.5);
xlabel('Eb/No(dB)');
ylabel('Eficiencia (bps/Hz)');
grid on
hold off
title('Eb/No vs Eficiencia en LTE con MIMO')
vtx = c(j).*bw;
fm = (30*log10(d)) + (10*log10(6 * cli * terr *(f/1000))) - (10*log10
((0.00001*d)/400)) - 70;
Vp = ((3*(10^8))/1.0003);
lam = (Vp/(f*(10^6)));
fd = ((VM*(1000/3600))/lam);
ro = 1;
lcr = (sqrt(2 * pi) * fd * ro * (exp(-(ro^2))));
dp = (((exp(-(ro^2)))/(ro * fd))*(1/sqrt(2 * pi)));
TC = (1 / (2 * pi * fd));
Ts = ((1/vtx)*(10^(-6)));
    if Ts < TC
        set(handles.comp_Tc,'String',' Ts << Tc => SLOW FADING ');
    else
        set(handles.comp_Tc,'String',' Ts >> Tc => FAST FADING ');
    end
end
Td = (td * 10^(-9));
BC = (1/(2 * pi * Td));
bc = (BC * (10^(-6)));
BW = ( bw * (10^6));
    if BC > BW
        set(handles.comp_Bc,'String',' Bc > Bw => FLAT FADING ');
    else
        set(handles.comp_Bc,'String',' Bc < Bw => SELECTIVE FADING ');
    end
end
set(handles.Vtx,'String',vtx);
set(handles.Efic,'String',c(j));
set(handles.FM,'String',fm);

```

```

set(handles.LCR, 'String', lcr);
set(handles.DP, 'String', dp);
set(handles.Bc, 'String', bc);
set(handles.Tc, 'String', TC);
else
    errordlg({'Algún parametro se encuentra errado', 'Revise los valores
ingresados y', 'vuelva a intentarlo'}, 'Mensaje de Error')
end
else
    errordlg({'Algún parametro se encuentra errado', 'Revise los valores
ingresados y', 'vuelva a intentarlo'}, 'Mensaje de Error')
end
% --- Programación del btn_blanquear.
function btn_blanquear_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to btn_blanquear (see GCBO)
set(handles.TD, 'String', '[0 - 1000]');
set(handles.Vm, 'String', '[0 - 500]');
set(handles.btn_k, 'String', '[0 - 100]');
set(handles.distancia, 'String', '[0 - 20]');
set(handles.Simbolos, 'String', '[0 - 1000000]');
set(handles.SNR, 'String', '[0 - 40]');
set(handles.Vtx, 'String', ' ');
set(handles.Efic, 'String', ' ');
set(handles.FM, 'String', ' ');
set(handles.LCR, 'String', ' ');
set(handles.DP, 'String', ' ');
set(handles.Bc, 'String', ' ');
set(handles.Tc, 'String', ' ');
set(handles.comp_Bc, 'String', ' ');
set(handles.comp_Tc, 'String', ' ');
set(handles.Antena_tx, 'value', 1);
set(handles.Antena_rx, 'value', 1);
set(handles.Frecuencia, 'value', 1);
set(handles.btn_TA, 'value', 1);
set(handles.tipo_terreno, 'value', 1);
set(handles.btn_BW, 'value', 1);
set(handles.Factor_climatico, 'value', 1);
set(handles.Moulacion, 'value', 1);
axes(handles.axes2)
plot([0 1], [0 1], 'w-');
axes(handles.axes3)
plot([0 1], [0 1], 'w-');
% ---Programación del btn_salir.
function btn_salir_Callback(hObject, eventdata, handles)
close(gcf)

```

Nota: Este es un extracto de la programación de los elementos utilizados en la interfaz LOS, el código completo se lo puede encontrar en el Anexo VI.

3.8. Sub-Interfaces secundarias

Para complemento de la funcionalidad se han creado dos subinterfaces, que se las puede encontrar en cada Interfaz en la pestaña de “Ayuda”. Las mismas que son:

- ✓ “Lista de ayuda”
- ✓ “Acerca de”

3.8.1. “Lista de Ayuda”

En esta subinterfaz llamada “Lista de Ayuda” se especifica cómo está estructurado el programa, para guía del usuario, es importante indicar que en esta interfaz se programó el botón “Ayuda de Matlab”, la cual ejecuta la ayuda apropiamente de MATLAB en la ventana principal.

Esta interfaz se compone de los siguientes elementos descritos en la Tabla 3.8.

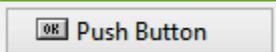
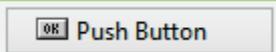
Elemento	Icono	Utilización
btn_ayuda		Se utiliza para programar el botón de ayuda de matlab (help)
btn_cerrar		Se utiliza para programar el botón de salida
edit_text		Se utiliza para mostrar el texto en la interfaz

Tabla 3.8: Botones utilizados en subinterfaz “Lista de Ayuda”

En la Figura 3.16 se muestra la pantalla de la interfaz llamada “Ayuda”

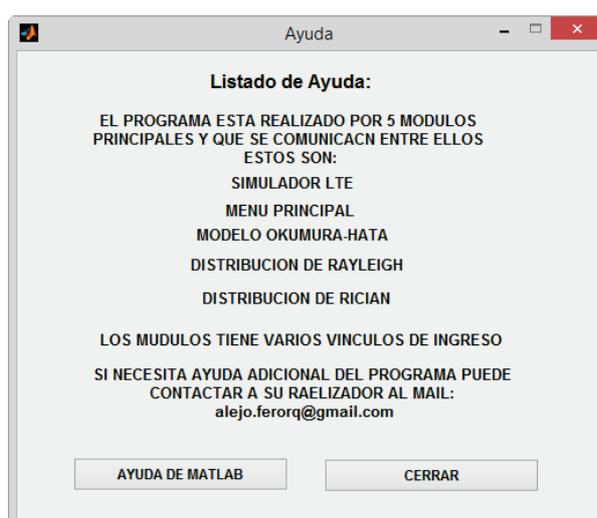


Figura 3.16: Subinterfaz “Lista de Ayuda”

Código Fuente de los elementos de la interfaz gráfica:

```

function varargout = Ayuda(varargin)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%           FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
%
%           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.
%
% PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
%
%           REALIZADO POR: FERNÁNDEZ ORQUERA LUIS ALEJANDRO
%
%           DIRECTOR: ING. CARLOS HERRERA.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Ayuda_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Ayuda_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function Ayuda_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;

guidata(hObject, handles);

function varargout = Ayuda_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

varargout{1} = handles.output;

% programación de btn_ayuda de MATLAB
function btn_ayuda_Callback(hObject, eventdata, handles)
help

% programación del btn_cerrar
function btn_cerrar_Callback(hObject, eventdata, handles)
close(gcf)

```



```

gui_State = struct('gui_Name',      mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Acerca_de_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Acerca_de_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function Acerca_de_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

handles.output = hObject;

guidata(hObject, handles);

function varargout = Acerca_de_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

% programación del btn_cerrar.
function btn_cerrar_Callback(hObject, eventdata, handles)
close(gcf)

```

En este capítulo se ha dado a conocer cada una de las interfaces y subinterfaces que contiene la simulación LTE, de una forma concreta y resumida, para el entendimiento del usuario final.

CAPÍTULO 4

COMPARACIÓN DEL CANAL INALÁMBRICO Y MODELO DE PROPAGACIÓN DE LTE

4.1. Introducción

En este capítulo se realiza la comparación de resultados de los datos proporcionados por el simulador y los datos teóricos que debe cumplir el sistema LTE, además se hace demostraciones con diversos escenarios de LTE en las diferentes interfaces, para comprobar el modo de funcionamiento y la forma de utilización del simulador, realizado en este proyecto, de esta manera orientar al usuario final la utilización del simulador de un modo fácil y práctico.

Como se mostró en el capítulo anterior, el simulador tiene 3 interfaces principales Okumura-Hata, NLOS (desvanecimiento de Rayleigh) y LOS (desvanecimiento de Rician / Rice), depende exclusivamente del usuario y como se requiera analizar el escenario, para elegir una interfaz, también depende de los datos que se tengan en cuenta, para introducirlos en el simulador y poder obtener resultados de cómo va a estar la señal de LTE.

Después de esta breve introducción se procede a mostrar la utilización del simulador.

4.2. Utilización del simulador

Para la ejecución del simulador basta que el usuario final tenga instalado MATLAB R2013a o superior, luego se debe proceder a ejecutar el simulador, para esto se debe digitar en la ventana principal de MATLAB el nombre del simulador, en este caso:

SIMULADOR_LTE

Una vez ejecutado el simulador, se muestra la interfaz principal, como se observa en la Figura 4.1, En esta interfaz existe un botón denominado “Menú Principal”, cuya principal función es direccionar al usuario a otra interfaz con ese nombre.



Figura 4.1: Interfaz SIMULADOR LTE

En la interfaz “Menú Principal”, las opciones se indican en la Figura 4.2, se puede seleccionar alguna de las interfaces que se desee ingresar para estudiar al canal inalámbrico.

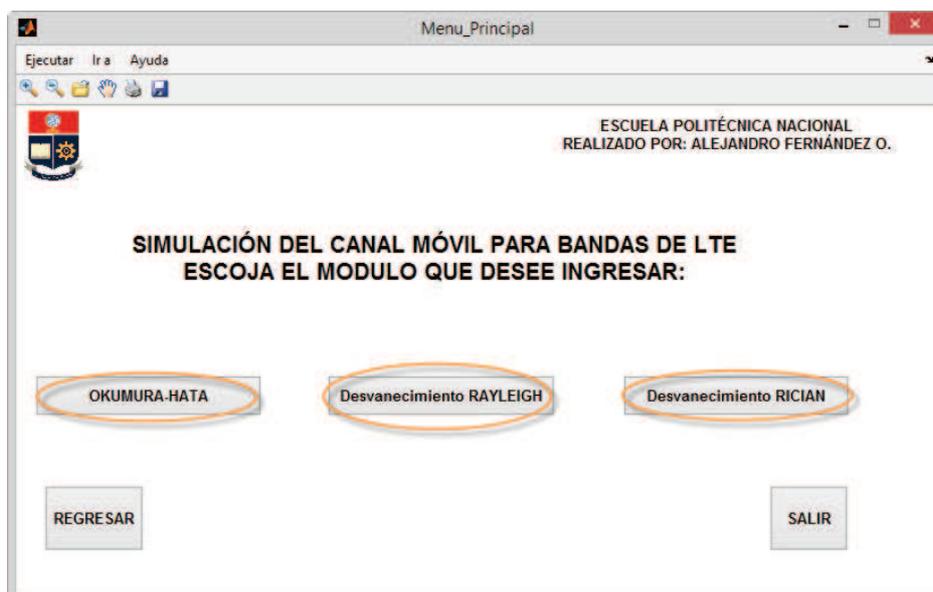


Figura 4.2: Interfaz “Menú Principal”

Cada una de las interfaces indican con su nombre la función principal que realizan y con diferentes funciones obtiene estudiar el canal inalámbrico, dando una idea fundamentada de como se espera esté la transmisión en un entorno real.

Continuando con la utilización del simulador se puede observar en las Figuras 4.3, 4.4, 4.5, las interfaces a las que direccionan los botones señalados en la interfaz menú principal.

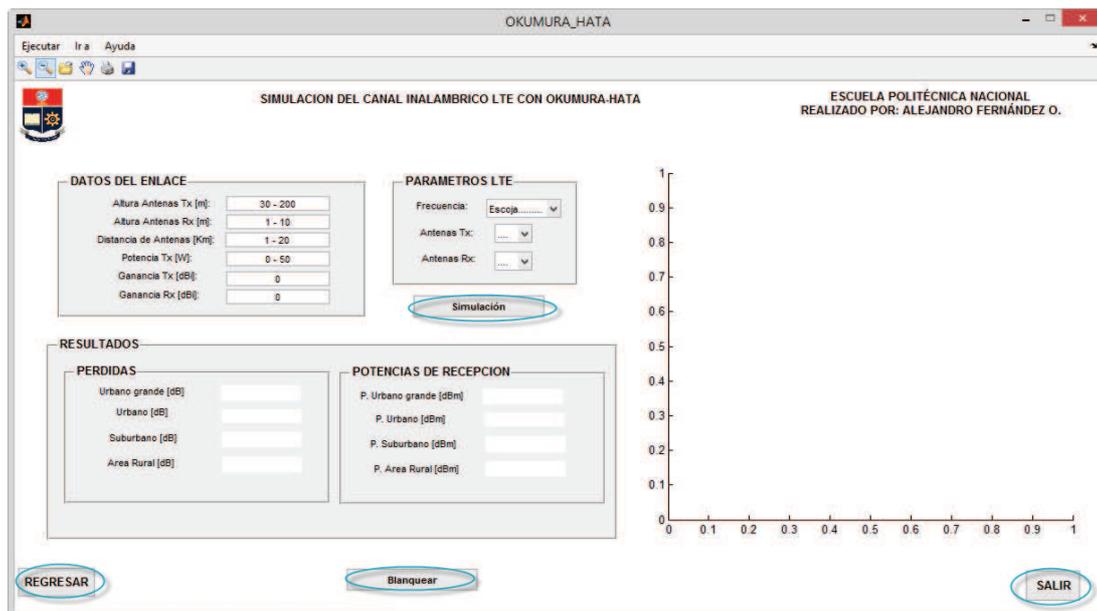


Figura 4.3: Interfaz Okumura-Hata

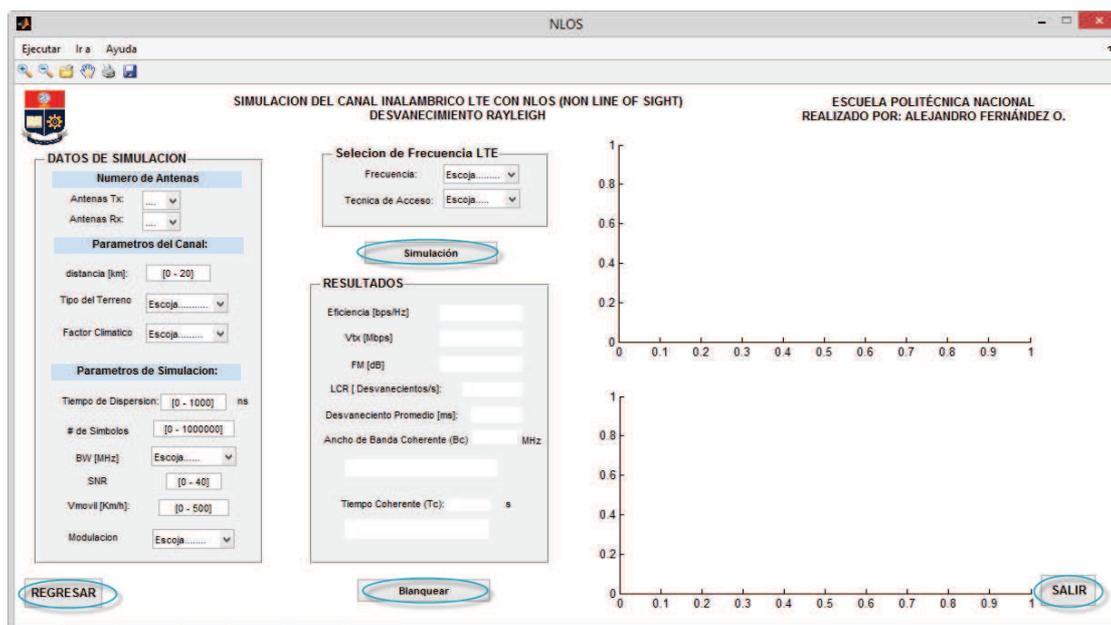


Figura 4.4: Interfaz NLOS (Non Line Of Sight)

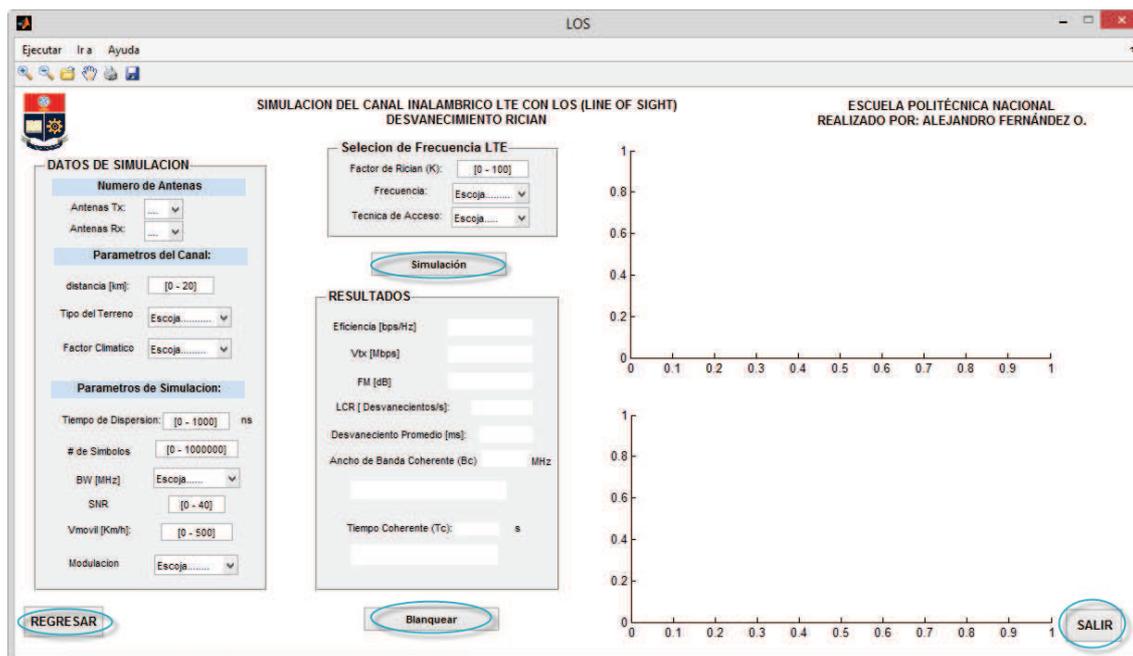


Figura 4.5: Interfaz LOS (Line Of Sight)

Cabe señalar que como se observa en cada Figura 4.3, 4.4, 4.5, se ha tomado en cuenta la parte de validación de datos es decir cuidar que los valores ingresados se encuentre en un rango provisto, sin poder ejecutar el programa si algún dato fuere mal ingresado o desapegado del rango, previo a un mensaje de error que ayuda al usuario a encontrar el parámetro erróneo.

Además cuentan con botones de blanquear, donde se puede borrar los datos si se deseara, botón de regresar al menú anterior y por último con el botón “salida” que ejecuta el proceso de salir cuando se desee del programa.

4.3. Comparación de resultados

En esta parte del trabajo, se procede a dividir los resultados en 3 partes, al igual que el número de interfaces, para proceder con la comparación y discusión de resultados.

4.3.1. Interfaz Okumura-Hata

La interfaz Okumura-Hata, está diseñada para simular las pérdidas existentes que se producen en los diferentes ambientes, está interfaz se ha programado para

entregar resultados de pérdidas en diferentes escenarios como son: ciudades grandes, ciudades pequeñas, ciudades con poca densidad poblacional y ambientes rurales, todos estos resultados serán obtenidos en decibelios (dB).

Otra función de esta interfaz, es entregar las potencias de recepción, la cual proporciona una concepción de que tan buena es la calidad de señal dependiendo de los diferentes ambientes.

Para conseguir los resultados mencionados, se debe ingresar al simulador, dos clases de datos los primeros son datos del enlace, se conocen así porque deben ser proporcionados para producir una cobertura designada tomando en cuenta el modelo de propagación y a la tecnología usada, en esta simulación se usa el modelo de propagación Okumura-Hata en tecnología LTE. Los otros datos a ingresar son parámetros propios de LTE como frecuencia de trabajo y número de antenas en transmisión y recepción.

En la Figura 4.6, se observa el resultado de la simulación de un enlace con las características propias de LTE en su Release 8.

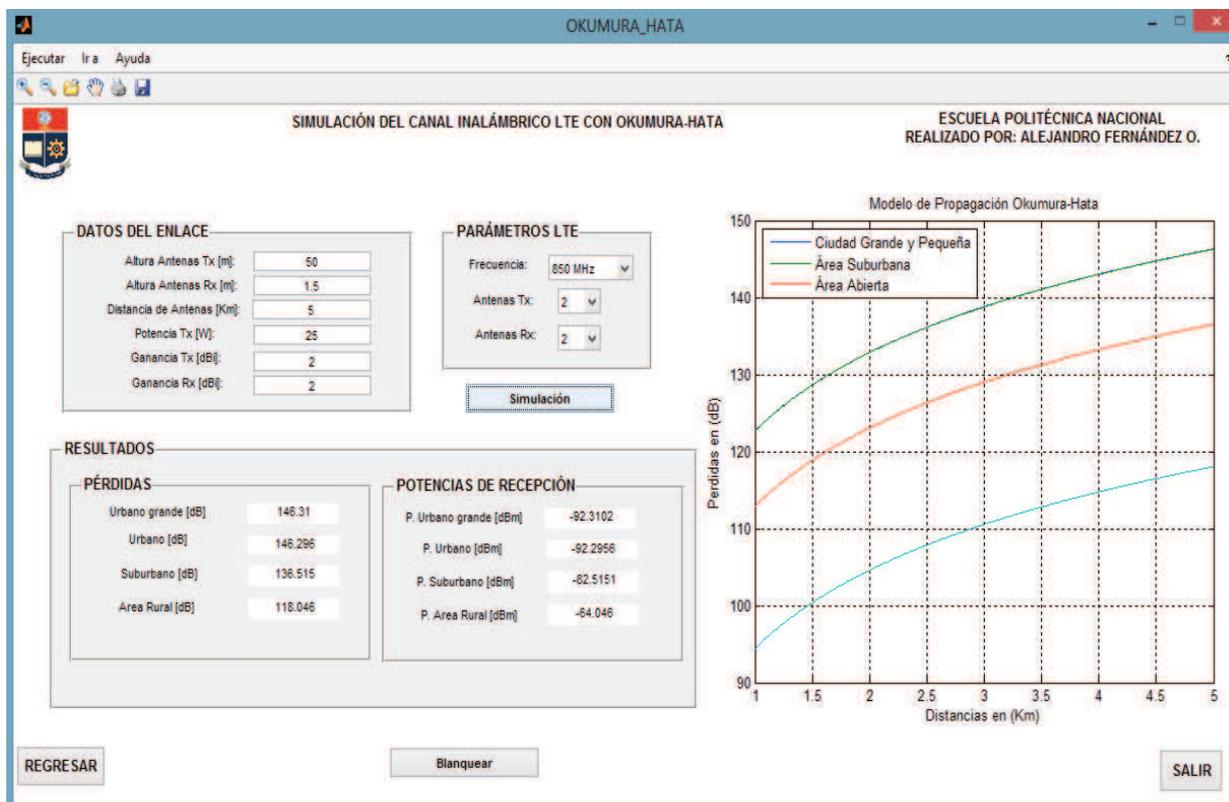


Figura 4.6: Interfaz Okumura-Hata con datos

Como se puede observar el resultado es interesante, dado que en las pérdidas se obtiene los valores adecuados, donde se indica que en las ciudades grandes con más obstáculos van a tener el mismo resultado que las ciudades más pequeñas, mientras cómo se suponía y se verifica en el marco teórico, las ciudades suburbanas y rurales tendrán pérdidas más bajas, por la menor cantidad de obstáculos.

En lo que se refiere a las potencias de recepción, se observa la misma tendencia, donde en las ciudades grandes y pequeñas van a tener menor potencia de la señal en comparación con las zonas suburbanas y rurales; cabe indicar que en los equipos celulares, la sensibilidad depende exclusivamente de los componentes del terminal, que es otro factor que influye para que se reciba el equipo final de usuario la potencia de recepción. [6]

En la Tabla 4.1 se indica un resumen de varias pruebas realizadas en la simulación de esta interfaz con diferentes números de antenas.

Release	Número de Antenas Tx	Número de Antenas Rx	Frecuencia (MHz)	Ptx (W)	Gtx (dBi)	Grx (dBi)	Pérdidas (dB)				Prx (dBm)			
							UrbOrd	Urb Pqn	Sub. urb	Rural	UrbOrd	Urb Pqn	Sub. urb	Rural
8	2	2	700	50	2	2	144.104	144.097	134.795	116.622	-87.094	-87.087	-77.784	-59.611
8	2	2	850	25	2	2	146.31	145.295	136.515	118.045	-92.31	-92.295	-82.5151	-64.045
8	2	2	1700	50	2	2	157.185	157.143	145.424	125.575	-100.175	-100.133	-88.413	-68.564
8	2	2	1900	25	2	2	158.403	158.449	146.338	126.221	-104.449	-104.403	-92.338	-72.2213
8	2	2	2100	50	2	2	159.585	159.535	147.153	126.784	-102.575	-102.525	-90.142	-69.773
9	2	4	700	25	10.5	5	135.484	135.477	126.175	108.02	-66.973	-66.966	-57.954	-39.491
9	2	4	850	50	20	2.5	137.69	137.67	127.895	109.426	-59.16	-59.154	-49.37	-30.92
9	2	4	1700	25	2	5	148.595	148.523	136.804	116.955	-68.557	-68.513	-76.793	-56.944
9	2	4	1900	50	10.5	2.5	149.82	149.78	137.718	117.501	-80.8	-80.75	-68.59	-48.58
9	2	4	2100	25	14.5	10	150.96	150.91	138.53	118.154	-73.455	-73.405	-61.022	-40.653
10	4	4	700	50	10	2	138.565	138.559	129.257	111.08	-67.55	-67.52	-58.22	-40.052
10	4	4	850	25	14.5	2	140.772	140.757	130.97	112.508	-68.251	-68.23	-58.4561	-39.98
10	4	4	1700	50	20	2	151.547	151.605	139.886	120.037	-70.515	-70.574	-58.854	-39.005
10	4	4	1900	25	2	2	152.91	152.95	140.8	120.68	-92.88	-92.84	-80.779	-60.68
10	4	4	2100	50	2	2	154.04	153.998	141.615	121.245	-91.01	-90.98	-78.58	-58.21
11	4	8	700	25	10.5	5	140.832	140.825	131.52	113.349	-66.3	-66.293	-56.98	-38.81
11	4	8	850	50	20	5	143.037	143.023	133.242	114.773	-55.99	-55.98	-46.2	-27.732
11	4	8	1700	25	14.5	2.5	153.91	153.87	142.151	122.302	-77.881	-77.839	-66.12	-46.27
11	4	8	1900	50	10	2.5	155.175	155.13	143.06	122.949	-80.63	-80.588	-68.524	-48.4
11	4	8	2100	25	14.5	2.5	156.313	156.263	143.88	123.51	-80.282	-80.232	-67.843	-47.48
12	8	8	700	50	20	5	140.832	140.825	131.522	113.349	-50.78	-50.77	-41.47	-23.29
12	8	8	850	25	10	5	141.99	141.78	133.242	114.77	-64.94	-64.72	-56.2	-37.73
12	8	8	1700	50	2	2	152.865	152.44	142.151	122.3	-83.81	-83.39	-73.09	-53.25
12	8	8	1900	25	10	5	154.13	153.67	143.06	122.949	-77.08	-76.63	-66.02	-45.9
12	8	8	2100	50	14.5	2	155.267	154.789	143.88	123.511	-73.715	-73.23	-62.32	-41.95

Tabla 4.1: Tabla comparativa de Okumura-Hata

El análisis de la Tabla 4.1 es importante puesto que se realizó con una diversidad de alternativas, dentro de los parámetros de la simulación donde se puede verificar que en el modelo Okumura-Hata 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, sin embargo, al entregar el valor de las pérdidas en diferentes ambientes, ayuda a tener una concepción al momento de definir distancias y coberturas para las radio bases en LTE y cualquier sistema celular.

En el tema de las potencias de recepción se puede decir que el sistema LTE con el modelo Okumura-Hata de acuerdo a los valores de simulación no tendrá pérdidas de señal, en el radio de cobertura de la radio base, lo cual favorece al sistema celular LTE.

4.3.2. Interfaz NLOS (*Non Line Of Sight*)

La interfaz NLOS (*Non Line Of Sight*) o desvanecimiento Rayleigh se fundamenta en proporcionar al usuario, datos de como se encuentra la señal al no tener una línea de vista en su transmisión y como va afectar este desvanecimiento al sistema de comunicación, tomando en cuenta las bandas de frecuencia y los factores de LTE, es por este motivo que se analiza mediciones como la eficiencia de la comunicación, la velocidad de transmisión, margen de desvanecimiento, rapidez de cruce de nivel, desvanecimiento promedio, ancho de banda coherente y tiempo coherente, para conocer en qué condiciones y bajo que parámetros la señal ingresa al móvil para poder recibir o enviar datos.

En esta interfaz, se analizan los parámetros de LTE en su Release 8, primero se comienza con los valores de LTE en Release 8 para su enlace descendente, como se verifica en la Figura 4.7.

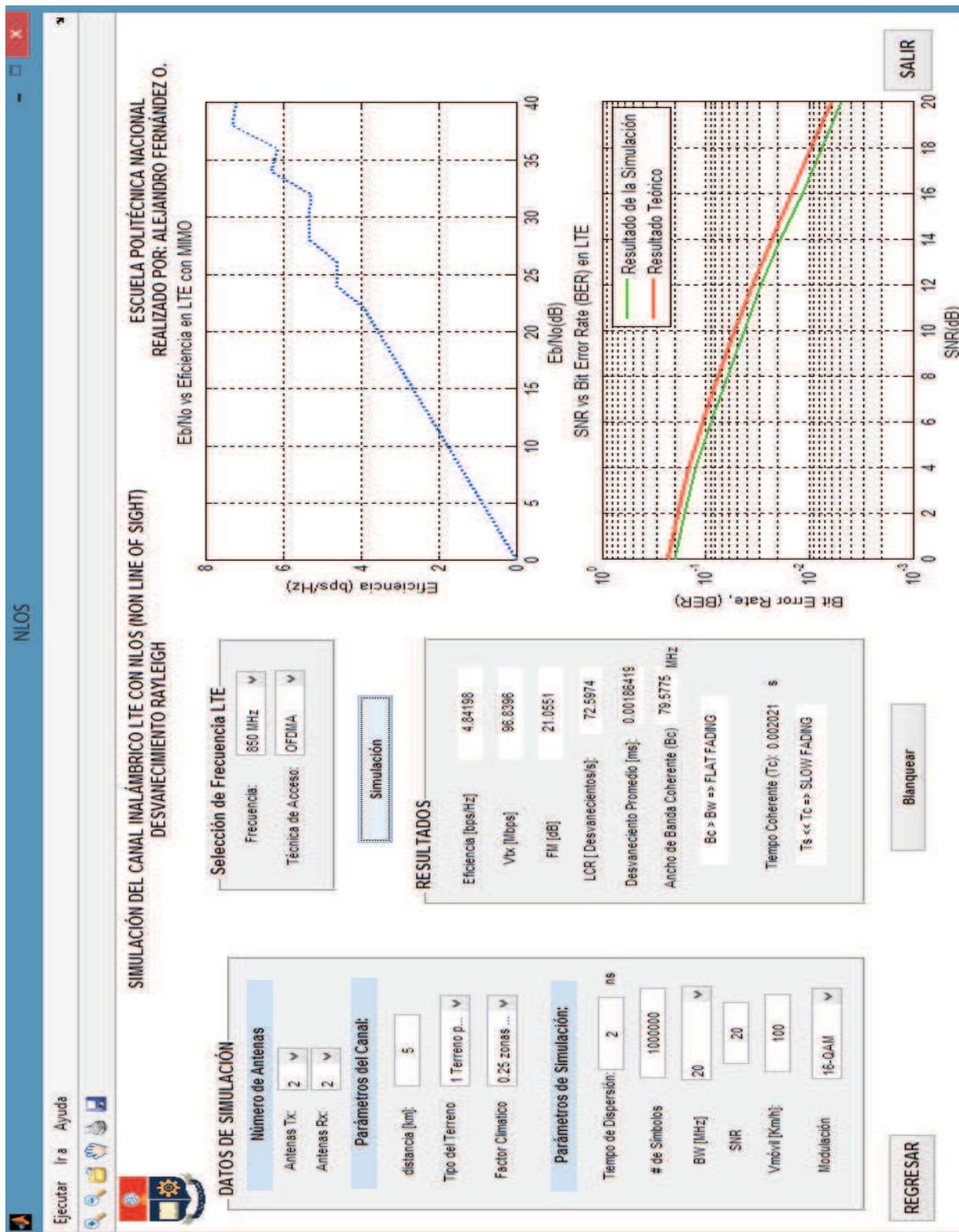


Figura 4.7: Interfaz NLOS (*Non Line Of Sight*) con datos en downlink

Descripción de la interfaz NLOS:

Como se observa en la Figura 4.7, se representa un modelo de desvanecimiento sin línea de vista, con distribución de Rayleigh, en la cual se ingresan valores

propios especificados por LTE en su Release 8 para downlink, (donde el tipo de acceso es OFDMA), obteniendo los valores que se observan en la Tabla 4.2.

Parámetros	Release 8 (LTE)	Simulación (LTE-NLOS)
	Datos ingresados	
Número de Antenas Tx	2	2
Número de Antenas Rx	2	2
Distancia (Km)	5	5
Tiempo de Dispersión (ns)	2	2
SNR (dB)	20	20
Velocidad de móvil (Km/h)	100	100
Modulación	16-QAM	16-QAM
Frecuencia (MHz)	850	850
Ancho de Banda (MHz)	20	20
Técnica de Acceso	OFDMA	OFDMA
Resultados	Teóricos	Simulación
Eficiencia (bps/Hz)	5	4.84
Vtx (Mbps)	100	96.83
LCR (Desv/s)	-----	72.59
Desvanecimiento Promedio (ms)	-----	0.0018

Tabla 4.2: Tabla de análisis de NLOS con Release 8 downlink

La Tabla 4.2 refleja que al poner en la interfaz de simulación los datos del Release 8 downlink, se obtiene como resultado de la simulación valores próximos a los estandarizados en el Release 8, dando al simulador un criterio de validez, lo cual significa que si se cambian los parámetros de entrada, los datos obtenidos por el simulador van a estar dentro del estándar LTE, adquiriendo una concepción fundamentada de los valores que tendría la señal en un ambiente real.

Teniendo claro el funcionamiento y comparación de los parámetros en LTE Release 8 para downlink, se procede a realizar la misma comparación para los parámetros de uplink, en la aplicación se puede diferenciar estos dos parámetros por la técnica de acceso, puesto que LTE downlink ocupa OFDMA y LTE uplink ocupa SC-FDMA.

En la Figura 4.8 se verifica los parámetros de LTE Release 8 en uplink.

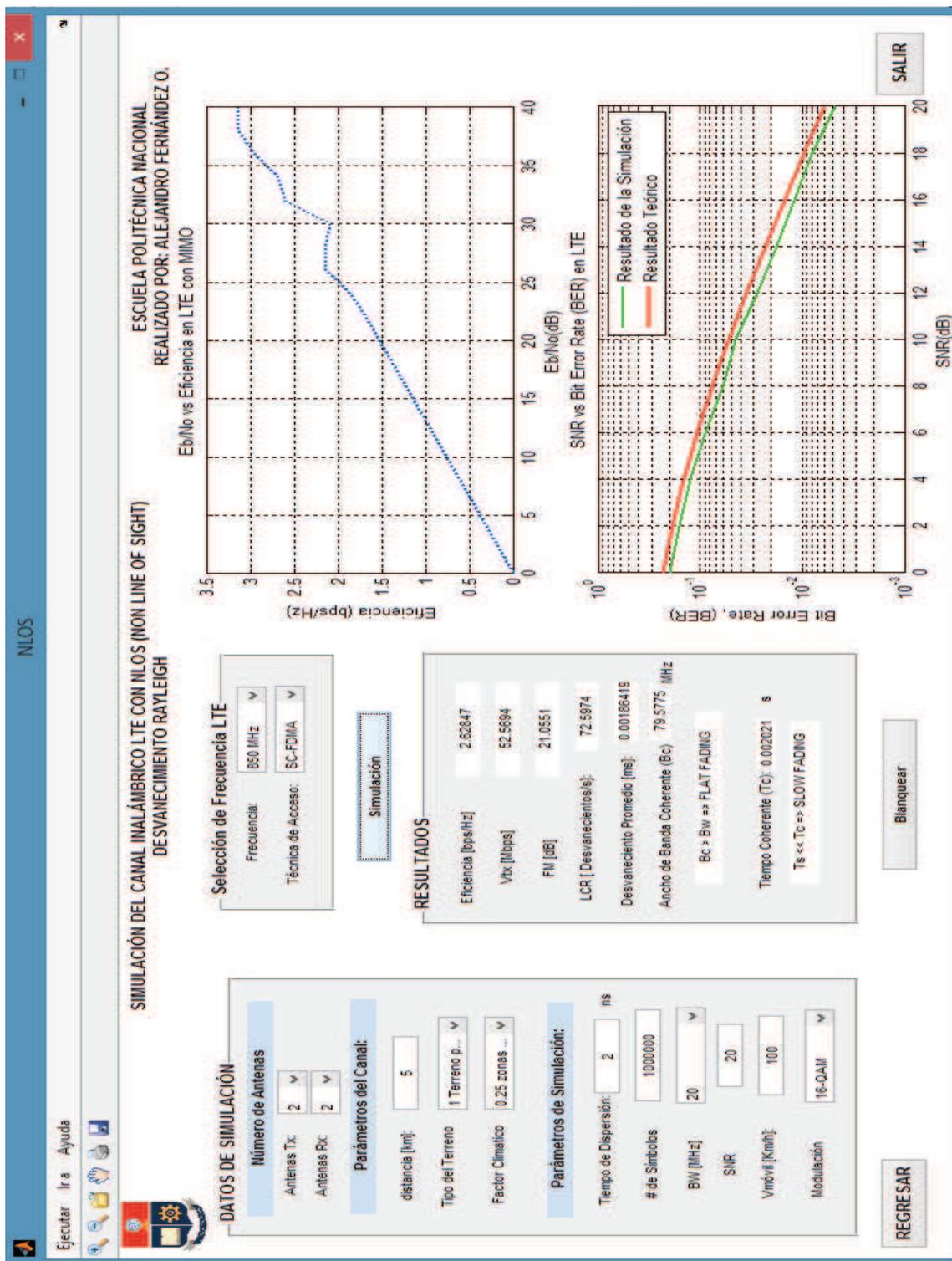


Figura 4.8: Interfaz NLOS (Non Line Of Sight) con datos en uplink

Como se puede observar en la Figura 4.8, con el cambio de técnica de acceso se obtiene los valores de LTE Release 8 en uplink, que se compara en la Tabla 4.3.

Parámetros	Release 8 (LTE)	Simulación (LTE-NLOS)
	Datos ingresados	
Número de Antenas Tx	2	2
Número de Antenas Rx	2	2
Distancia (Km)	5	5
Tiempo de Dispersión (ns)	2	2
SNR (dB)	20	20
Velocidad de móvil (Km/h)	100	100
Modulación	16-QAM	16-QAM
Frecuencia (MHz)	850	850
Ancho de Banda (MHz)	20	20
Técnica de Acceso	SC-FDMA	SC-FDMA
Resultados	Teóricos	Simulación
Eficiencia (bps/Hz)	> 2.5	2.62
Vtx (Mbps)	> 50	52.56
LCR (Desv/s)	-----	72.59
Desvanecimiento Promedio (ms)	-----	0.0018

Tabla 4.3: Tabla de análisis de NLOS con Release 8 uplink

La Tabla 4.3, muestra que los valores de Eficiencia y Velocidad de transmisión son aceptables dentro del rango teórico de LTE Release 8 en uplink, lo cual permite que el simulador tenga validez y continúe ofreciendo una idea clara de cómo se encontraría la señal en diferentes ambientes, con distintos parámetros siempre que se encuentre dentro de los rangos de LTE.

A continuación se realiza la comparación entre el simulador y los datos de LTE Release 10, que toma el nombre de LTE-Advanced.

En la Figura 4.9, se presenta la simulación con los datos de LTE-Advanced para uplink y la consiguiente Tabla 4.4, donde se compara los resultados de la simulación con los datos teóricos el estándar LTE-A.

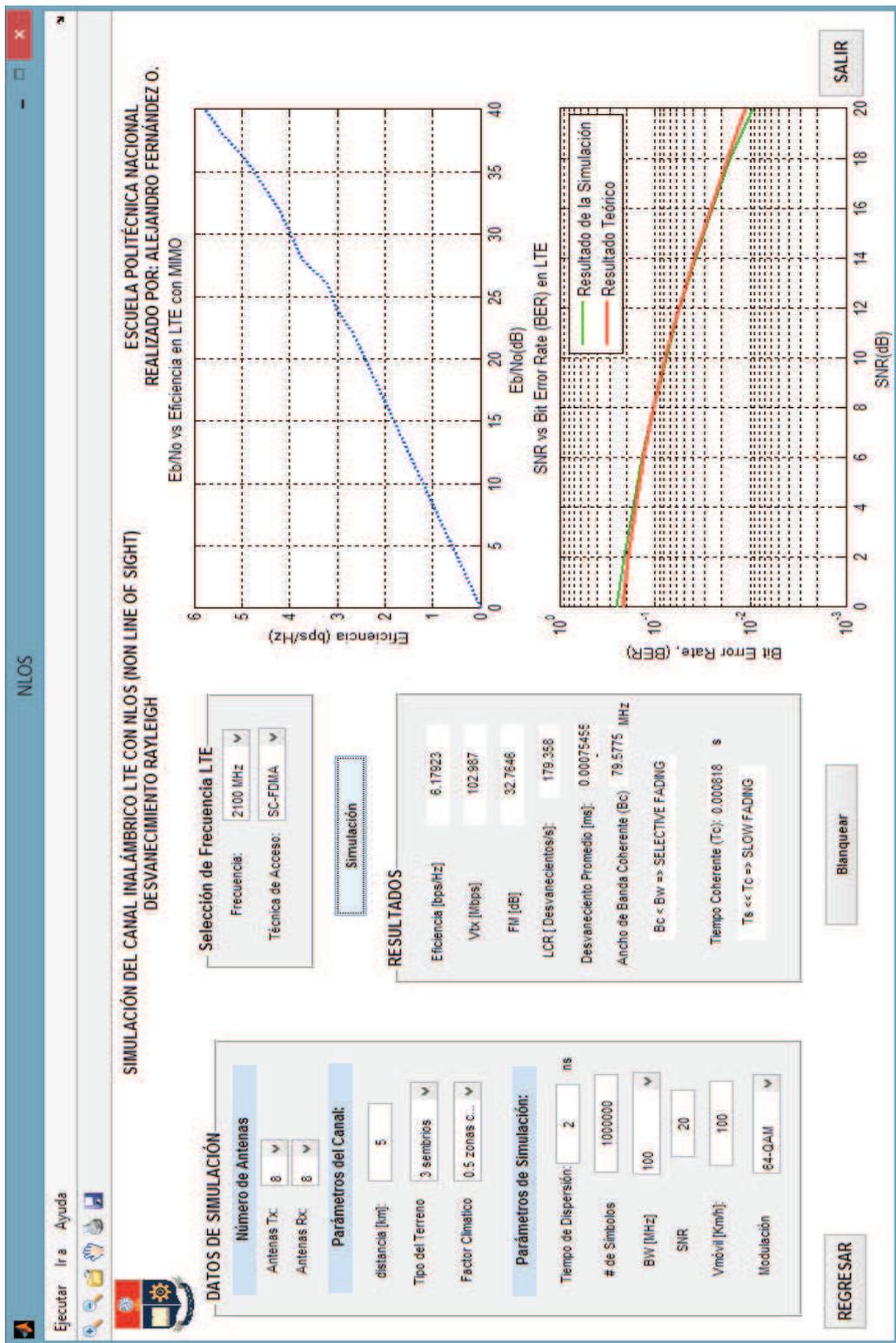


Figura 4.9: Interfaz NLOS con datos en uplink (LTE Advanced)

Parámetros	LTE-Advanced	Simulación (LTE-NLOS)
	Datos ingresados	
Número de Antenas Tx	8	8
Número de Antenas Rx	8	8
Distancia (Km)	5	5
Tiempo de Dispersión (ns)	2	2
SNR (dB)	20	20
Velocidad de móvil (Km/h)	100	100
Modulación	64-QAM	64-QAM
Frecuencia (MHz)	2100	2100
Ancho de Banda (MHz)	100	100
Técnica de Acceso	SC-FDMA	SC-FDMA
Resultados	Teóricos	Simulación
Eficiencia max(bps/Hz)	6.75	6.17
Vtx max (Mbps)	100	102.98
LCR (Desv/s)	-----	179.35
Desvanecimiento Promedio (ms)	-----	0.00007

Tabla 4.4: Tabla de análisis de NLOS con LTE-Advanced uplink

La Tabla 4.4, permite comparar los resultados de la simulación y los datos teóricos expuestos por LTE-Advanced, en lo cual se puede ver una aproximación de la simulación hacia los datos teóricos bastante buena permitiendo que el simulador nos proporcione una información importante de como estaría la señal si se cambiará los datos de ingreso, o para hacer un simil con la realidad si se tuviera diferentes escenarios.

4.3.3. Interfaz LOS (*Line Of Sight*)

La interfaz LOS (*Line Of Sight*).- Desvanecimiento Rician o Rice, se fundamenta en proporcionar al usuario, datos de como se encuentra la señal al tener una línea de vista en su transmisión y como va favorecer o afectar este desvanecimiento al sistema de comunicación, tomando en cuenta las bandas de frecuencia y los factores de LTE, es por este motivo que se analiza mediciones

como la eficiencia de la comunicación, la velocidad de transmisión, margen de desvanecimiento, rapidez de cruce de nivel, desvanecimiento promedio, ancho de banda coherente y tiempo coherente, para conocer en qué condiciones y bajo qué parámetros la señal ingresa al móvil para poder recibir o enviar datos.

Para verificar la funcionalidad de la interfaz LOS, se compara a continuación el simulador con los datos teóricos de LTE Release 9.

A continuación se presenta la Figura 4.10 y Tabla 4.5, con el Release 9 de LTE en downlink con la interfaz LOS (*Line Of Sight*).

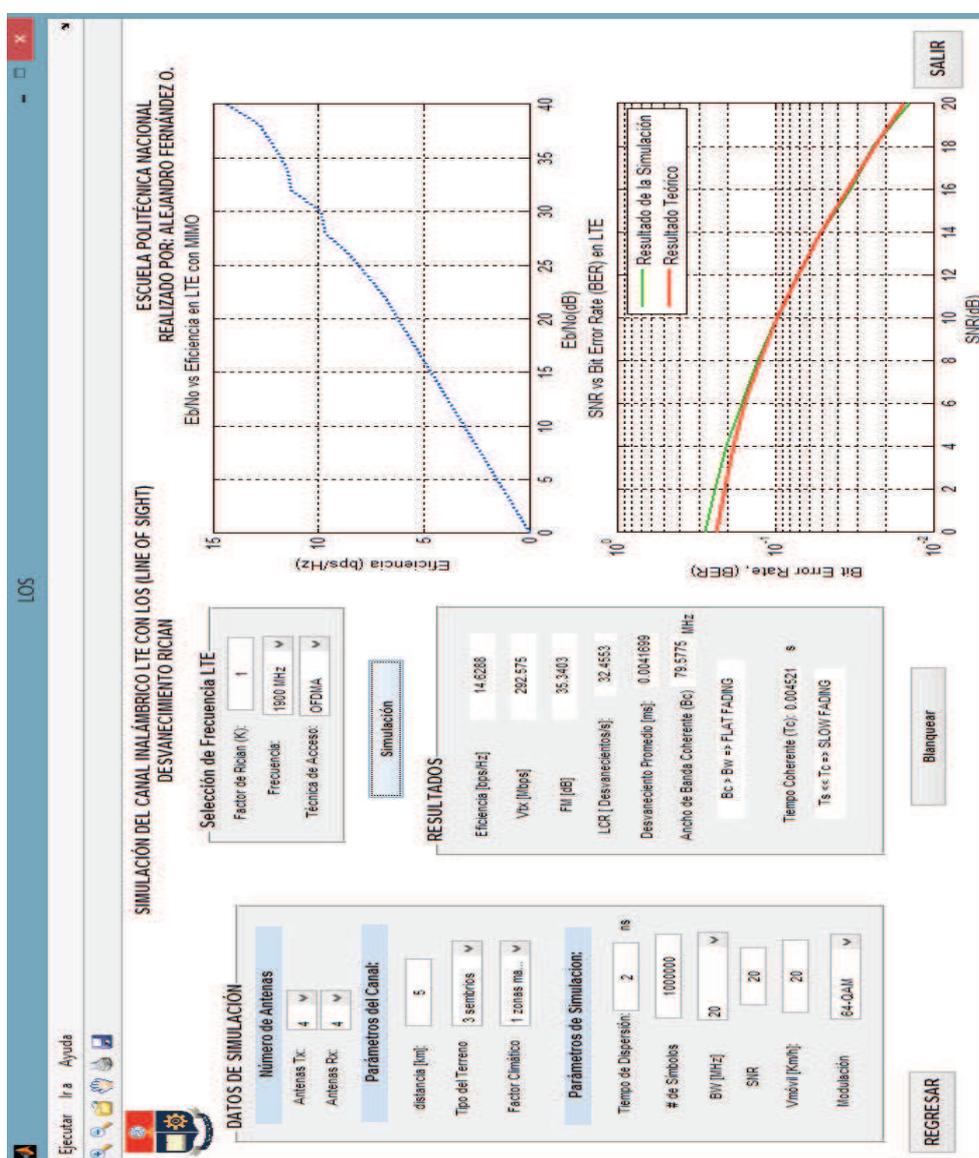


Figura 4.10: Interfaz LOS (*Line Of Sight*) con datos en downlink

Parámetros	Rease 9 (LTE)	Simulación (LTE-LOS)
	Datos ingresados	
Número de Antenas Tx	4	4
Número de Antenas Rx	4	4
Distancia (Km)	5	5
Tiempo de Dispersión (ns)	2	2
SNR (dB)	20	20
Velocidad de móvil (Km/h)	20	20
Modulación	64-QAM	64-QAM
Frecuencia (MHz)	1900	1900
Ancho de Banda (MHz)	20	20
Técnica de Acceso	OFDMA	OFDMA
Resultados	Teóricos	Simulación
Eficiencia max(bps/Hz)	15	14.62
Vtx max (Mbps)	300	292.57
LCR (Desv/s)	-----	32.45
Desvanecimiento Promedio (ms)	-----	0.004

Tabla 4.5: Tabla de análisis de LOS con Release 9 downlink

En la Tabla 4.5, se observa que los valores entregados por el simulador al compararlos con los valores teóricos del estándar LTE Release 9, son muy cercanos, esto se da esencialmente por la línea de vista, lo cual demuestra que los sistemas de comunicación inalámbricos con línea de vista tienen mejor recepción de señal y puede ser más fácil su modelación por la no obstaculización de la señal.

Este simulador trata de conceptualizar como va a estar los valores que se pueden obtener en un canal inalámbrico, con las frecuencias y parámetros de LTE que es la parte fundamental del estudio de este proyecto.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- ✓ Una vez finalizado este proyecto se concluye que LTE es una tecnología que se ha desarrollado de singular manera en los últimos tiempos y continua desarrollándose hasta la actualidad, este proceso se ha dado por la compatibilidad de *Long Term Evolution* (LTE) con sus tecnologías antecesoras, donde se beneficia de no cambiar toda su infraestructura de red en un solo proceso, más bien se lo puede dividir en varias etapas sin complicaciones debido a la alta de integración que poseen los equipos de la red LTE.
- ✓ La infraestructura de red del sistema LTE hace que los equipos sean menos voluminosos y más productivos, añadiendo varios procesos, en un solo nodo con mejores características denominado entidad de gestión de movilidad, el cual funciona como un equipo del núcleo de LTE.
- ✓ Los servicios que ofrece el sistema LTE como son: voz sobre IP (VoIP), juegos en línea, telepresencia, televisión móvil HD, contenido multimedia, etc, han permitido hacer conocido a este sistema y ayudar a la evolución de las redes celulares a grandes velocidades, de acuerdo, a las necesidades y requerimientos de los usuarios; mientras que por parte de los operadores celulares no se preocuparían de la migración y continua evolución del sistema LTE, pues este sistema tiene la ventaja de realizar solo una actualización de software para pasar a su posterior evolución *LTE-Advanced* la cual es considerada como una red de cuarta generación.

- ✓ Este proyecto en la primera parte se enfocó a la descripción del sistema LTE, donde se verificó que uno de los protocolos mas importantes que utiliza está tecnología es protocolo NAS (Non-Access Stratum), el mismo que se utiliza para la conexión entre el equipo de usuario y los nodos centrales de la red LTE, permitiendo el registro y establecer relación con la entidad de gestión móvil, haciendo posible la comunicación y teniendo el beneficio de realizar este proceso de modo transparente para el usuario final.
- ✓ En la aplicación desarrollada en este trabajo se pretende tener las herramientas adecuadas en forma de simulación para entender el funcionamiento del sistema celular LTE, sin embargo, como es un sistema de simulación propiamente dicho se basó en un modelo de propagación como es el Okumura-Hata que nos sirve para tener la idea fundamentada de cuanta potencia podría llegar a un terminal móvil si se aplicase este modelo en una ciudad o región.
- ✓ Los análisis y comparaciones realizadas con los datos teóricos de la tecnología LTE dieron como resultado que el simulador elaborado en este proyecto es útil para ser usado en fines educativos y al ser usado en el campo laboral daría una idea bastante útil del comportamiento del sistema para ser convalidado en la parte real.
- ✓ En el modelo de propagación propiamente dicho se dieron interesantes resultados que es bueno recalcar como que en el modelo Okumura-Hata el factor fundamental es la frecuencia ya que después de realizar varias pruebas con diferentes parámetros se puede concluir que el cambio de frecuencia es lo que afectó de manera más preponderante a los resultados obtenidos en cada uno de los ambientes simulados.
- ✓ En las interfaces LOS y NLOS se verificó que la movilidad de terminales LTE garantizan sus estándares en velocidades de 350 km/h, dependiendo de la banda de frecuencia, hasta un radio de 5 km de cobertura, para poder

cumplir con sus diferentes valores teóricos y corroborados por la simulación de este proyecto.

- ✓ Cabe señalar que en el sistema LTE no solo dependen de las radio bases para la cobertura ofrecida en el sistema, sino también de los terminales móviles que soportan LTE es así que en el primer capítulo se especificó clases de terminales dependiendo de la velocidad y modulación que soporta cada uno de los dispositivos calificándolos del 1 al 5 según los parámetros de capacidad de antenas, velocidad de transmisión y modulación, así mismo para el estándar posterior de LTE-*Advanced* se continúa con la clasificación según los parámetros ya mencionados, donde se toman categorías del 6 al 8, dando como la mejor estación móvil a los dispositivos que se clasifiquen como 8.

- ✓ El simulador realizado en este proyecto llamado SIMULADOR_LTE fue completamente desarrollado para *Long Term Evolution*, dando en el proceso de construcción varias complicaciones hasta obtener el resultado final, puesto que los códigos con los que se desarrolló fueron consultados solo en la ayuda de MATLAB, a los cuales se realizó varias modificaciones para la adaptación al programa deseado, donde se ha permitido desarrollar el interés por los fundamentos de un sistema como LTE y unirlo a un programa de simulación.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda que se continúe realizando proyectos sobre el sistema LTE, pues cada componente de este sistema tiene una parte tecnológica para su funcionamiento, que se denota interesante para su estudio a profundidad.

- Es conveniente decir que se continúe observando el sistema LTE, por su evolución que ahora se encuentra en LTE-*Advanced* y su futura evolución de LTE-*Beyond*, donde las mejoras que se realizan sobre esta tecnología son interesantes.

- En el sistema LTE se presentaron varios procedimientos de gestión de seguridad, por lo que se recomienda profundizar en los temas de seguridades dados en la tecnología LTE.
- Se recomienda realizar trabajos con LTE en simulación para diferentes modelos de propagación puesto que sería interesante en un futuro ver cuál de los modelos de propagación se adapta de mejor manera en nuestro país.
- Se recomienda diferenciar entre LTE que es una tecnología de tercera generación y *LTE-Advanced* la cual si es una tecnología de cuarta generación, por cumplir requisitos impuestos por la UIT, sin embargo, cabe decir que las dos tecnologías tienen buenas velocidades de transmisión, que permiten cumplir con los requerimientos de los usuarios actuales.

Bibliografía

- [1] 3GPP, www.3gpp.org,
<http://www.3gpp.org/technologies/keywords/acronyms/98-lte>,
<http://www.3gpp.org/technologies/keywords/acronyms/97-lte-advanced>,
<http://www.3gpp.org/technologies/keywords/acronyms/96-nas>,
<http://www.3gpp.org/technologies/keywords/acronyms/100-the-evolved-packet-core>,
<http://www.3gpp.org/technologies/keywords/acronyms/101-carrier-aggregation-explained>.
- [2] Sinche Soraya, Folleto de Comunicaciones Inalámbricas, EPN, 2012.
- [3] Williant Stallings, WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKS, SECOND EDITION, Pearson Prentice Hall, 2005.
- [4] Cecilia Alberto, Lucas Chiesa, Margarita Manterola, Tecnologías GPRS y EDGE, trademark de Havet Interactive, 2001.
- [5] Harri Holma, Antti Toskala, WCDMA for UMTS: HSPA Evolution and LTE, Fifth Edition, John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, UK, DEC 2010
- [6] Stefania Sesia, ST-Ericsson, France, Issam Toufik, ETSI, France, Matthew Baker Alcatel-Lucent, UK, LTE – The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice, A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, Second Edition, published 2011.
- [7] M. Kottkamp, A. Rossler, J. Schilienz, J. Schutz, LTE Release 9 Technology Introduction, December 2011.
- [8] www.4gamericas.org, 4G Mobile Broadband Evolution: 3GPP Release 10 and Beyond - HSPA+, SAE/LTE and LTE-Advanced, See 4G Americas, October 2012.
- [9] www.4gamericas.org, 3GPP Release 11: Understanding the Standards for HSPA+ and LTE-Advanced Enhancements, August 2013.
- [10] Nokia Siemens Networks, LTE Release 12 and Beyond, www.nokiasiemensnetworks.com, Copyright © 2012.

- [11] P. Beming, L. Frid, G. Hall, P. Malm, T. Noren, M. Olsson y G. Rune, LTE-SAE Architecture and Performance. Ericsson Review No. 3. 2007.
- [12] Ramón Agusti, Francisco Bernardo, Fernando Casadevall, Ramon Ferrús, Jordi Pérez-Romero, Oriol Sallen, LTE: NUEVAS TENDENCIAS EN COMUNICACIONES MÓVILES, Editorial Fundación Vodafone España, 2010.
- [13] Cabrejas Peñuelas, J., Calabuig Soler, D., Cardona, N., Fernández Aguilera, A., García Lozano, M., González G., D., Martin-Sacristán Gandía, D., Montserrat, J.F., Olmos Bonafé, J.J. & Ruiz Boqué, S, 3GPP LTE: Hacia la 4G móvil, Marcombo, Barcelona, 2011.
- [14] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold, Per Beming “3G Evolution HSPA and LTE for Mobile Broadband” Editorial: Academic Press, 2008.
- [15] Qiaoyan Qu, Despliegue de una Red LTE en Madrid, Universidad Carlos III de Madrid, 2012
- [16] 3G_Americas_RysavyResearch_HSPA-LTE_Advanced_Sept2009, http://www.3gamericas.org/documents/3G_Americas_RysavyResearch_HSPA-LTE_Advanced_Sept2009.pdf.
- [17] Agilent Technologies. 3GPP Long Term Evolution: System Overview, Product Development and Test Challenges. www.agilent.com [Online] 2009. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-8139EN.pdf>
- [18] Request for Comments 4960 The Internet Engineering Task Force (IETF), Network Working Group, ‘Stream Control Transmission Protocol’, <http://www.ietf.org>.
- [19] Steepest Ascent Ltd. Control signaling - downlink control channel. <http://www.steepestascent.com/content/mediaassets/html/LTE/Help/PDCCH.html>.
- [20] R. Surgiewicz, N. Strom, A. Ahmed, and Y. Ai. LTE uplink transmission scheme. <http://www.mehrpouyan.info/Projects/Group%201.pdf>.
- [21] 3GPP TS 24.301, “Non-Access-Stratum (NAS) protocol for Evolved Packet System (EPS); Stage 3”.www.3gpp.com.

- [22] <http://www.scribd.com/doc/5540011/UMTS-Forum-Towards-Global-Mobile-Broadband-LTE-White-Paper>
- [23] Gonzalo Camarillo y Miguel Ángel García, The 3G IP Multimedia Subsystem (IMS): Merging the Internet and the Cellular Worlds, Editorial Wiley, Tercera Edición 2008.
- [24] M. Anas, F.D. Calabrese, P.-E-Ostling, K.I. Pedersen, .E. Mogensen, "Performance Anaylsis of Handover Measurements and Layer-3 Filtering for UTRAN LTE". IEEE 18th International Symposium on In Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007.
- [25] Laurent Belmon, End-to-End-Efficiency-E, https://ict-e3.eu/project/deliverables/full_deliverables/E3_WP6_D6.1_080715.pdf
- [26] C. Bormann, Robust Header Compression, <http://tools.ietf.org/html/rfc3095>
- [27] Goldsmith, Wireless Communications. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [28] Vijay K. Garg, WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING, Morgan Kaufmann Publishers is an imprint of Elsevier, San Francisco, © 2007.
- [29] Oriol Sallent Roig, José Luis Valenzuela González, Ramon Agustí Comes, Principios de comunicaciones móviles, Madrid 2010.
- [30] Sampei, Seiichi. Applications of Digital Wireless Technologies to Global Wireless Communications. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997. 15. Seidel, S. Y., and Rappaport, T. S. "914 MHz Path Loss Prediction.
- [31] Andreas F. Molisch, Fellow, IEEE, University of Southern California, USA, WIRELESS COMMUNICATIONS, Editorial John Wiley & Sons Ltd, Second Edition, 2011.
- [32] Acceso bidireccional, <http://redeswimax.jimdo.com/wimax/acceso-al-medio/acceso-bidireccional/>
- [33] Holma, H. & Toskala, LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA based radio access, John Wiley & Sons Inc, M.W. 2011.

- [34] Oscar Somarriba Jarquín Subgerente de Diseño & Optimización RF, Gerencia de Ingeniería Móvil, Claro Nicaragua, Tecnología LTE: La nueva alternativa en comunicaciones inalámbricas, 18 de agosto del 2011
- [35] Claude Oestges, Bruno Clerckx, MIMO WIRELESS COMMUNICATIONS From Real-World Propagation to Space- Time Code Design, October 2010.
- [36] Christina Gessner, Andreas Roessler, LTE technology and LTE test; a deskside chat, April 2009.
- [37] R. He and J. Xei, "BER Performance of M-QAM and MPSK Nakagami fading channel with STTD," IEEE Inter. Sympo. On per. Indoor and mobile Radio commun, 2003.
- [38] EventHelix.com Inc. 3GPP LTE channels and MAC layer, <http://eventhelix.com/lte/presentations/3GPP-LTE-MAC.pdf>.
- [39] Ramón Zuñiga, Introducción al uso de MATLAB, <http://www.geociencias.unam.mx/~bole/eboletin/Matlabintro0408.pdf>
- [40] MATLAB, Creating Graphical User Interfaces R2013a, www.mathworks.com, COPYRIGHT 2000–2013 by The MathWorks, Inc, March 2013.
- [41] Manuel Berenguel Soria y Teodoro Álamo Cantarero, TUTORIAL DE INTRODUCCIÓN A MATLAB, 2008.
- [42] K. Sigmon. Introducción a matlab, Segunda Edición. Department of Mathematics, U. Florida. Traducido del inglés por Celestino Montes, Dep. Matemática Aplicada II, U. Sevilla, 2002.
- [43] Help en la interfaz de MATLAB.

Glosario de Términos

LTE	Long Term Evolution
1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
4G	Four Generation
3GPP	Third Generation Partnership Project
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
QoS	Quality of Service
FDMA	Frequency Division Multiple Access
CDMA	Code División Múltiple Access
TDMA	Time Division Multiple Access
GSM	Global System for Mobile Communications
SMS	Short Message Service
WAP	Wireless Application Protocol
GPRS	General Packets Radio System
EDGE	Enhanced Data Rates for Global Evolution
MMS	Multimedia Messaging Short
EV-DO	Evolution-Data Optimized
EV-DV	Evolution-Data Video
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access
HSPA	High Speed Packet Access

HSPA+	High Speed Packet Access Plats
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSUPA	High Speed Upwmlink Packet Access
SAE	System Architecture Evolution
HD	High Definition
DL	Downlink
UL	Uplink
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access
SC-FDMA	Single Carrier – Frequency Division Multiple Access
MIMO	Multiple-input Multiple-output
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
16-QAM	16 Quadrature Amplitude Modulation
64-QAM	64 Quadrature Amplitude Modulation
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Services
PWS	Public Warning System
MSR	Multi Standard Radio
CoMP	Coordinación de transmisión / recepción Multi-Point
IP	Internet Protocol
SAE	System Architecture Evolution
EPS	Evolved Packet System
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
EPC	Evolved Packet Core
P-GW	Packet Network Gateway Data
PDN-GW	Packet Network Gateway Data

S-GW	Serving Gateway
MME	Mobility Management Entity
NAS	Non-Access Stratum
AKA	Authentication and Key Agreement
HSS	Home Subscriber Server
PCRF	Policy and Charging Rules Function
OCS	Online Charging System
OFCS	Offline Charging System
eNB	Evolved NodeB
IETF	Internet Engineering Task Force
IMS	IP Multimedia Subsystem
SIP	Session Initiation Protocol
P-CSCF	Proxy Call Session Control Function
I-CSCF	Interrogating Call Session Control Function
OSA-SCS	Open Service Access-Service Capability Server

ANEXOS

Anexo I: W-CDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) con duplexación FDD y con duplexación TDD

WCDMA es una técnica que se basa en el sistema de división por código, donde la banda base es ensanchada en su espectro, mediante la multiplicación por una secuencia conocida de alta frecuencia. La secuencia conocida permite identificar la señal en banda base en ambos extremos de la transmisión (receptor y transmisor). Al tener mayor frecuencia la señal ensanchada permite una mayor velocidad de transmisión. Para la recuperación de la señal de banda base en la recepción se multiplica la señal modulada por la misma secuencia. Esta operación restaura el ancho de banda de la señal útil (banda base), sin embargo, ensancha la de cualquier otra señal interferente de banda estrecha que pudiera recibirse.

Anexo II: Tabla servicios de LTE

Service category	Current environment	LTE environment
Rich voice	Real-time audio	VoIP, high quality video conferencing
P2F messaging	SMS, MMS, low priority e-mails	Photo messages, IM, mobile e-mail, video messaging
Browsing	Access to online information services, for which users pay standard network rates. Currently limited to WAP browsing over GPRS and 3G networks	Super-fast browsing, uploading content to social networking sites
Paid information	Content for which users pay over and above standard network charges. Mainly text-based information.	E-newspapers, high quality audio streaming
Personalisation	Predominantly ringtones, also includes screensavers and ringbacks	Realtones (original artist recordings), personalised mobile web sites
Games	Downloadable and online games	A consistent online gaming experience across both fixed and mobile networks
TV/ video on demand	Streamed and downloadable video content	Broadcast television services, true on-demand television, high quality video streaming
Music	Full track downloads and analogue radio services	High quality music downloading and storage
Content messaging and cross media	Peer-to-peer messaging using third party content as well as interaction with other media	Wide scale distribution of video clips, karaoke services, video-based mobile advertising
M-commerce	Commission on transactions (including gambling) and payment facilities undertaken over mobile networks	Mobile handsets as payment devices, with payment details carried over high speed networks to enable rapid completion of transactions
Mobile data networking	Access to corporate intranets and databases, as well as the use of applications such as CRM	P2P file transfer, business applications, application sharing, M2M communication, mobile intranet/extranet

Anexo III: Procedimientos de gestión de seguridad

Los principales procedimientos asociados con la gestión de seguridad son los siguientes:

- Autenticación y selección de clave. El mecanismo que se utiliza en el acceso a través de E-UTRAN se denomina EPS AKA.
- Activación del modo seguro para la señalización NAS. Mediante este procedimiento la entidad MME controla la activación y el modo de operación de los servicios de confidencialidad e integridad que se aplican a la señalización NAS.
- Comprobación de la identidad del terminal. Este procedimiento permite interrogar al equipo de usuario desde la entidad MME para que indique la identidad del terminal (i.e., International Mobile Equipment Identity, IMEI). Con esta información el operador de la red podría, por ejemplo, detectar la utilización de un terminal robado a través de la comprobación pertinente en la base de datos EIR (Equipment Identity Register) considerada en redes 3GPP.
- Activación del modo seguro en la red de acceso E-UTRAN. Mediante este procedimiento la entidad MME indica a un eNB que active los servicios de confidencialidad e integridad. El establecimiento de estos servicios se señala mediante mensajes RRC específicos entre eNB y equipo terminal.

Authentication and Key Agreement

Mediante el procedimiento EPS AKA el usuario (i.e., la aplicación USIM) y la red LTE se autentican mutuamente. Además, como resultado del procedimiento queda establecida la clave intermedia KASME a partir de la cual se derivan todas las claves utilizadas en los servicios de confidencialidad e integridad.

El mecanismo EPS AKA asegura que las claves de cifrado e integridad no se han utilizado anteriormente. El mecanismo es compatible con otros sistemas 3G debido a que los principales organismos de estandarización (3GPP, 3GPP2) han adoptado el mismo protocolo de autenticación. El mecanismo EPS AKA puede soportarse con una tarjeta USIM Release 99 o posterior.

Gestión de la localización

Tal como se ha descrito en el apartado anterior, la red debe disponer de mecanismos para conocer con un determinado nivel de resolución la localización de los terminales que se encuentren registrados (estado EMM-Registered) pero que no tengan establecida una conexión con ninguna estación base (estado ECM-Idle).

Para ello, en LTE se define el concepto de Área de Seguimiento (Tracking Area, TA) para gestionar la información de localización. Un TA agrupa a un conjunto de eNBs de forma que la información de localización disponible en la red troncal EPC de un determinado equipo de usuario solamente se conoce en base a la resolución proporcionada por tales agrupaciones.

La identidad de un TA se denomina TAI (Tracking Area Identifier) y se difunde a través de los mensajes de información de sistema enviados en los canales de broadcast de los eNBs que integran una TA. Un eNB sólo puede pertenecer a una TA de una red troncal EPC, es decir, no hay solapes entre diferentes TAs. El equipo de usuario, a partir del identificador TAI recibido, es el encargado de comunicar a la red en qué TA se encuentra accesible mediante los mecanismos de Network Attach y de Tracking Area Update. De esta forma, cuando la red necesita contactar con el terminal, el mensaje de aviso (paging) se difunde a través de todas las estaciones base que integran el TA en que se encuentra localizado el terminal.

La selección de qué estaciones base integran cada una de las TAs es un aspecto de ingeniería que plantea un compromiso entre la carga de señalización que originan los mecanismos de TAU y la carga asociada al procedimiento de aviso de los equipos de usuario: si las TAs están formadas por pocos eNBs, el número de accesos a la red por parte de los terminales para actualizar su localización aumenta. Un elevado número de accesos repercute tanto en la carga de la red como en el consumo de baterías de los equipos de usuario. En cambio, cuando la red debe avisar a un equipo de usuario, el procedimiento de paging puede ser más selectivo ya que afecta a pocas celdas.

La gestión de la localización mediante áreas de seguimiento es un planteamiento ya utilizado en redes anteriores como UMTS y GSM. En particular, en dichas redes, la localización de terminales registrados en el dominio de circuitos se realiza mediante el concepto de área de localización (Location Area, LA) y mediante la definición de áreas de rutado (Routing Area, RA) en el dominio de paquetes¹³. Al igual que las TA de LTE, las agrupaciones LA y RA tampoco presentan solape y su determinación plantea los mismos compromisos esgrimidos anteriormente.

Sin embargo, una modificación importante que introduce LTE es la posibilidad de que un terminal se encuentre registrado en múltiples TAs a la vez, es decir, en una lista de TAs. Esta modificación responde a la necesidad de disponer de mecanismos que ayuden a minimizar la señalización debida a las actualizaciones de localización en las zonas limítrofes entre TAs. En estas zonas, determinados patrones de movilidad de los equipos de usuario, podrían originar un número de TAUs elevado si el terminal va conmutando sucesivamente entre eNBs de diferentes TAs. Para ello, mediante el registro a múltiples TAs, el equipo terminal únicamente actualiza su localización en el caso de que se mueva fuera de la cobertura del grupo de TAs que integran la lista, con la excepción de la actualización periódica de TA. El conjunto de TAs que integran la lista lo controla la red y lo comunica al terminal mediante el procedimiento de actualización de TA (cuando el terminal se registra en una determinada TA, la red le envía la lista de TAs en las que mantiene un registro para el terminal). Nótese que, mediante una gestión apropiada de la lista de TAs por terminal, la red LTE puede confeccionar de forma dinámica áreas de localización “personalizadas” que conduzcan a una reducción de la señalización asociada a los procedimientos de TAU y Paging.

Es importante destacar que el marco de gestión de movilidad en LTE ha sufrido importantes simplificaciones respecto a la solución de movilidad de UMTS donde la red de acceso UTRAN también participa en la gestión de la localización mediante la definición de áreas de rutado propias (UTRAN Routing Areas, URAs) y de un conjunto de estados asociados a la gestión de movilidad en la capa RRC (e.g., cell-FACH, URA-PCH, etc.). En cambio, en el sistema LTE, la gestión de localización se sustenta íntegramente en la red troncal EPC.

Anexo IV: Dispositivos de usuario para LTE



Anexo V: Antenas de Estación Base para LTE

LTE MIMO de antena de panel plano

LTE MIMO de antena plana, resistente a la vivienda del tiempo, de frecuencias 791-862 MHz, polarización vertical, ganancia de 2×10.5 dBi, $V / R > 22$ dB, Alpha H 75° , 60° E alfa, P_{max} 50 W, 2 x conector hembra N , altura 500 mm, ancho 250 mm, profundidad 28 mm. Completar con el poste de montaje.

El LTE/MIMO/FP10 es una dirección de alto rendimiento de la antena de mayor alcance, la mejora de la señal y los datos de aceleración para LTE móvil.

Nota: En el LTE/MIMO/FP10 son dos antenas separadas con respecto, por lo que sólo necesita una antena de su router MIMO LTE.



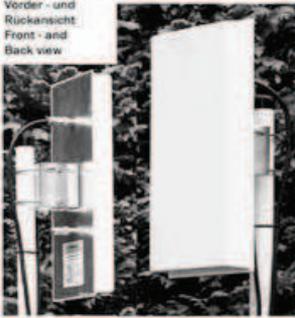
LTE MIMO Flachpanel Antenne, wetterfestes Gehäuse, Frequenz 791-862 MHz

LTE/MIMO - Flachpanel Richtantenne
LTE - Flatpanel directional Antenna (4G)

LTE/MIMO/FP 10

Frequency range	791-862 MHz (LTE/digitale Dividende)
Gain (typ.)	2 x 10,5 dBi
Front-to-back ratio	2 x > 22 dB
System-Entkopplung	> 20 dB
αE (vertikal Pattern)	2 x 75°
αH (horizontal Pattern)	2 x 60°
VSWR	< 1,15 (für/for 845 MHz)
Power (max) input	50 W
Impedance	50 Ohm
Connector	N-Conn. (optional TNC // 16/9)
Bauart/Syst.	2-fach BAZ-Doppelquad-System 2-way BAZ-Doublequad-System

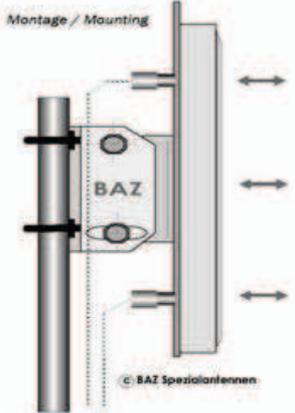
Vorder- und Rückansicht
Front- and Back view



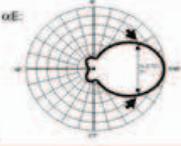
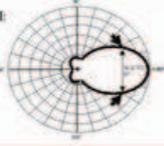
Auf Kundenwunsch Lieferung neutral (ohne Frontbeschriftung)
On customer request antenna outfit neutral (without front inscription) possible.

Mechanische Daten / Mechanical Data	
max. Resistance	150 km/h
Weight (appr.)	1200 g
Polarization	H/V
Height (H)	500 mm
Width (B)	250 mm
Depth (L)	28 mm (+ Mounting 125 mm)
Mounting Mast	35 - 85 mm
Mast (optional)	max. 120 mm

Montage / Mounting



© BAZ Spezialantennen

αE :  αH : 

BAZ Spezialantennen Werk Karlsruhe/Vertrieb-Logistik Bad Bergzabern (Germany), PO Box 1115, D-76881 Bad Bergzabern
 Tel. +49 8153 810 773 Fax +49 8153 77241 info@spezialantennen.com www.spezialantennen.eu

Yagi antenna para LTE 700/800

LTE antenna Yagi directional with a half-wave dipole, mounted on a mast, the beams, polarization horizontal and vertical, connector female N, with the mounting of the mast. Technical data: 17,5 dBi G, V / R > 22 dB, 28 ° E Alfa, Alfa H 32 °, length 215 cm, W 6 cm, H 14 cm.



LTE 700/800 Yagi Antena direccional

LTE antena Yagi direccional con un dipolo de media onda abierta, montado en el mástil delantero, polarización horizontal y vertical, conector hembra N, con el montaje del mástil. Datos técnicos: 14,5 dBi G, V / R > 22 dB, 34 ° E Alfa, Alfa H 40 °, longitud 116 cm, W 6 cm, H 14 cm.



LTE2600 Antena Direccional 2.3-2.7 GHz

Planos antena panel de LTE, resistente a la vivienda del tiempo, la frecuencia de 2300-2700 MHz, polarización vertical / horizontal, G 15 dBi, V / R > 18 dB, Alpha H 29 °, 29 ° E alfa, Pmax 50 W, conector hembra N, altura 250 mm, ancho 250 mm, profundidad 25 mm. Completar con el poste de montaje.



Anexo VI: Programa completo LTE

En el CD adjunto se incorpora todos los aspectos logos, figuras textos y programación completa de la simulación realizada en este trabajo.