

ALGORITMO DE CONTROL DE POTENCIA PARA EL SIMULADOR BÁSICO A NIVEL DE SISTEMA PARA LTE



Angela Julieth Moreno Delgado

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Telecomunicaciones

Grupo de Radio e Inalámbricas-GRIAL

Popayán, 2017

ALGORITMO DE CONTROL DE POTENCIA PARA EL SIMULADOR BÁSICO A NIVEL DE SISTEMA PARA LTE



Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en Electrónica
y Telecomunicaciones

Angela Julieth Moreno Delgado

Directora: Msc. Claudia Milena Hernández Bonilla

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Telecomunicaciones

Grupo de Radio e Inalámbricas-GRIAL

Popayán, 2017



CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO I. GENERALIDADES	13
1.1 Requisitos y Objetivos para LTE.....	14
1.2 Arquitectura de Red.....	14
1.2.1 Equipo de Usuario	15
1.2.2 Red de Acceso E-UTRAN.....	17
1.2.3 Núcleo de Red EPC.....	18
1.3 Características de LTE.	19
1.3.1 Flexibilidad del Espectro.....	19
1.3.2 Bloque de Recurso y Trama de LTE.....	20
1.3.3 Esquema de Transmisión	21
1.3.4 Tecnologías Multi-antena	22
1.3.5 Coordinación de la Interferencia Inter-celda (ICIC, Inter-cell Interference Coordination).....	23
1.3.6 Gestión de Recursos Radio (RRM, Radio Resource Management)	23
CAPÍTULO II. CONTROL DE POTENCIA.....	25
2.1 Funciones del Control de Potencia	25
2.2 Técnicas de Control de Potencia.....	26
2.3 Control de Potencia en LTE.....	30
2.3.1 Procedimiento de Control de Potencia en UL.	30
2.4 Selección de las Técnicas de Control de Potencia	33
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE DESARROLLO.....	35
3.1 INTRODUCCIÓN.....	35
3.2 REQUERIMIENTOS	35
3.2.1 Requerimiento Funcionales	36
3.2.2 Requerimientos no Funcionales.....	36
3.3 ANÁLISIS Y DISEÑO	36
3.3.1 Modelo del Sistema	37



3.3.2. Diseño de Control de Potencia en Lazo Abierto.....	38
3.3.3 Diseño de Control de Potencia en lazo Cerrado	40
3.4 IMPLEMENTACIÓN	41
3.4.1 Cálculo de Potencia de Ruido por RB.....	41
3.4.2 SINR Objetivo	42
3.4.3 Cálculo de Po	42
3.4.4 Pérdidas de Propagación.....	42
3.4.5 Asignación de Conjunto de Sub-portadoras al UE	43
3.4.6 Obtención de la Potencia de Transmisión del UE	44
3.4.7 Validación de la Potencia de Transmisión del UE	44
3.4.8 SINR y Ruido del Sistema	44
3.4.9 Calculo de Radio de Cobertura y Servicio	46
3.4.10 Planificación de Recursos Radio	46
3.4.11 Obtención del TBS y CQI a partir de la SINR.....	47
3.4.12 Resultados.....	49
3.4.13 Algoritmo de Control de Potencia en Lazo Cerrado.	51
3.4.14 Interfaz Gráfica.	51
3.6 PRUEBAS	51
CAPÍTULO IV. CASOS DE ESTUDIO.....	53
4.1 INTRODUCCIÓN.....	53
4.2 ESCENARIO 1	53
4.2.1 Análisis de la Potencia de Transmisión y SINR Instantánea	54
4.2.2 Análisis de la Potencia de Transmisión.....	56
4.2.3 Análisis de Probabilidad de Servicio	57
4.3 ESCENARIO 2	59
4.3.1 Análisis de la Potencia de Transmisión.....	59
4.3.2 Análisis de Probabilidad de Servicio	60
4.3.3 Análisis de la Cobertura.....	61
4.3.4 Análisis de Throughput	63
4.4 ESCENARIO 3	65
4.4.1 Análisis de la Potencia de Transmisión.....	66
4.4.2 Análisis de la Probabilidad de Servicio	67
4.4.3 Análisis del Throughput	68
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	70
5.1 INTRODUCCIÓN.....	70



5.2 CONCLUSIONES.....	70
5.3 TRABAJOS FUTUROS	72
BIBLIOGRAFIA	73



LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Evolución de los Estándares 3GPP.....	13
Figura 1.2 Arquitectura de Alto nivel de LTE	14
Figura 1.3 Elementos de la Red EPS.....	15
Figura 1.4 Arquitectura Interna del UE	16
Figura 1.5 Arquitectura E-UTRAN.....	17
Figura 1.6 Elementos Lógicos del EPC.....	18
Figura 1.7 LTE y su Evolución	19
Figura 1.8 Duplexación por División de Tiempo y Frecuencia	20
Figura 1.9 Bloque de Recuso y Elemento de Recurso	21
Figura 1.10 Tecnología de Acceso LTE	21
Figura 1.11 Múltiple Entrada Múltiple Salida Multiplexación Espacial.....	22
Figura 1.12 Funciones de RRM	23
Figura 2.1 Subconjunto de Funcionalidades de RRM.....	25
Figura 2.2 Control de Potencia en Lazo Abierto	27
Figura 2.3 Control de potencia en LTE	31
Figura 3.1 Iteración en RUP.....	35
Figura 3.2 Entradas y Salidas del Bloque de Capacidad del Simulador	37
Figura 3.3 Pasos realizados para la obtención de resultados en el Bloque de Capacidad utilizando UFR	38
Figura 3.4 Diagrama de Flujo del algoritmo de Control de Potencia en Lazo Abierto.....	39
Figura 3.5 Diagrama de Flujo del algoritmo de Control de Potencia en Lazo Cerrado.....	41
Figura 3.6 Throughput vs SINR.....	42
Figura 3.7 Asignación de Conjunto de Sub-portadoras	43
Figura 3.8 Escenario de Identificación de UEs interferentes para un UE de la celda de estudio.....	45
Figura 3.9 Obtención del Radio de Cobertura	46
Figura 3.10 Gráfica de Cobertura.....	49
Figura 3.11 Gráficas de SINR, Throughput y Potencia recibida	50
Figura 3.12 Gráfica de Potencia de Transmision de UE en cada iteracion	50
Figura 3.13 Interfaz gráfica de la versión 4 del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE	50
Figura 4.1 Potencias de transmisión de UE en cada iteración a una distancia cerca, lejos e intermedia al eNB de servicio.....	54
Figura 4.2 CDF Potencia de Transmisión con OLPC y CLPC variando radio de celda	56



Figura 4.3	CDF Potencia de Transmisión OLPC y CLPC variando el factor de compensación.....	60
Figura 4.4	Gráficas de Cobertura con OLPC variando el factor de compensación.....	63
Figura 4.5	CDF <i>Throughput</i> con OLPC y CLPC variando el factor de compensación.....	64
Figura 4.6	CDF de Potencia de Transmisión con OLPC y CLPC variando la SINR objetivo.....	66
Figura 4.7	CDF <i>Throughput</i> con OLPC y CLPC variando la SINR objetivo.	69



LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Categorías de UE en LTE	16
Tabla 1.2 Anchos de Banda Soportados para celda LTE	20
Tabla 2.1 Características de los Mecanismos de Control de Potencia	29
Tabla 2.2 Selección de Tecnicas de Control de Potencia.....	33
Tabla 3.1 Relación entre el ancho de banda y el número de Sub-portadoras...31	
Tabla 3.2 Tabla de CQI y SINR de referencia requerida.....	47
Tabla 3.3 Mapeo de CQI al índice del Esquema de Modulación y Codificación48	
Tabla 3.4 Índice del TBS y Modulación para el PUSCH	49
Tabla 4.1 Parámetros fijos de Simulación Escenario 1.....	54
Tabla 4.2 Probabilidad de Servicio sin desvanecimiento	57
Tabla 4.3 Probabilidad de Servicio con desvanecimiento lento	57
Tabla 4.4 Probabilidad de Servicio con desvanecimiento rápido	58
Tabla 4.5 Parámetros fijos de Simulación Escenario 2.....	59
Tabla 4.6 Probabilidad de Servicio variando el factor de compensación.	61
Tabla 4.7 Parámetros fijos de Simulación del escenario 3	65
Tabla 4.8 Probabilidad de Servicio variando la SINR objetivo	67



LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Pruebas de verificación del Simulador Básico a Nivel de Sistema para
LTE



LISTA DE ACRÓNIMOS

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i> , Proyecto Asociación de Tercera Generación.
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i> , Sistema Avanzado de Telefonía Móvil.
ANSI	<i>American National Standards Institute</i> , Instituto Nacional Estadounidense de Estándares.
APN	<i>Access Point Name</i> , Nombre del Punto de Acceso.
ARQ	<i>Automated Repeat Request</i> , Solicitud de Repetición Automática.
BLER	<i>Block Error Rate</i> , Tasa de Error de Bloque.
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i> , Función de Distribución Acumulada.
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Código.
CDMA IS-95	<i>Code Division Multiple Access Interim Standard 95</i> , Acceso Múltiple por División de Código Estándar Interno 95.
CLPC	<i>Closed Loop Power Control</i> , Control de Potencia en Lazo Cerrado.
DL	<i>Downlink</i> , Enlace Descendente.
EDGE	<i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i> , Tasas de Datos Mejoradas para la Evolución GSM.
eNB	<i>Evolved Base Station</i> , Estación Base Evolucionada.
EPC	<i>Evolved Packet Core</i> , Núcleo de Paquetes Evolucionado.
EPS	<i>Evolved Packet System</i> , Sistema de Paquetes Evolucionado.
E-UTRAN	<i>Evolved Universal Terrestrial Access Network</i> , Red de Acceso Radio Terrestre Universal Evolucionada.
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i> , Duplexación por División de Frecuencia.
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia.
FEC	<i>Forward Error Correction</i> , Corrección de Errores hacia Adelante.
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i> , Servicio General de Paquetes vía Radio.
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i> , Sistema Global para Comunicaciones Móviles.
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i> , Solicitud de Repetición Automática Híbrida.
HSPA	<i>High-Speed Packet Access</i> , Acceso de Paquetes de alta Velocidad.
HSS	<i>Home Subscriber Server</i> , Servidor de Abonado Local.



ICIC	<i>Inter-cell Interference Coordination</i> , Coordinación de la Interferencia Inter-celda.
IMS	<i>Internet Protocol Multimedia Subsystem</i> , Subsistema Multimedia del Protocolo de Internet.
IMT- 2000	<i>International Mobile Telecommunications-2000</i> , Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000.
IP	<i>Internet Protocol</i> , Protocolo de Internet.
JTACS	<i>Japanese Total Access Communication</i> , Sistema de Comunicación de Acceso Total Japonés.
LTE	<i>Long Term Evolution</i> , Evolución a Largo Término.
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i> , Esquema de Modulación y Codificación.
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i> , Múltiple Entrada Múltiple Salida.
MME	<i>Mobility Management Entity</i> , Entidad de gestión de la Movilidad.
MT	<i>Mobile Termination</i> , Terminación Móvil.
NAS	<i>Non-Access Stratum</i> , No Estrato de Acceso.
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales.
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal.
OLPC	<i>Open Loop Power Control</i> , Control de Potencia en Lazo Abierto.
PAPR	<i>Peak to Average Power Ratio</i> , Relación Potencia Pico a Potencia Promedio.
PC	<i>Power Control</i> , Control de Potencia.
PCRF	<i>Policy and Charge Rules Function</i> , Función de Reglas de Control y de Políticas.
PDN	<i>Packet Data Network</i> , Red de Paquetes de Datos.
PDSCH	<i>Physical Downlink Shared Channel</i> , Canal Físico Compartido del enlace Descendente.
PF	<i>Proportional Fair</i> , Proporcionalidad Justa.
P-GW	<i>PDN Gateway</i> , Pasarela de Red de Paquetes de datos.
PRB	<i>Physical Resource Block</i> , Bloque de Recurso Físico.
PUCCH	<i>Physical Uplink Control Channel</i> , Canal Físico de control del Enlace Ascendente.
PUSCH	<i>Physical Uplink Shared Channel</i> , Canal Físico Compartido del Enlace Ascendente.
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> , Modulación de Amplitud en Cuadratura.
QPSK	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i> , Desplazamiento de Fase en Cuadratura.
RE	<i>Resource Element</i> , Elemento de Recurso.
RUP	<i>Rational Unified Process</i> , Proceso Unificado de Rational.
SAE	<i>System Architecture Evolution</i> , Evolución de la Arquitectura del Sistema.
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única.
S-GW	<i>Serving Gateway</i> , Pasarela de Servicio.



SMS	<i>Short Message Services</i> , Servicios de Mensajería Corta.
SRS	<i>Sounding Reference Signal</i> , Señal de Referencia de Sondeo.
TACS	<i>Total Access Communication</i> , Sistema de Comunicación de Acceso Total.
TDD	<i>Time Division Duplexing</i> , Duplexación por División de Tiempo.
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Tiempo.
TDMA IS-136	<i>Time Division Multiple Access Interim Standard 136</i> , Acceso Múltiple por División de Tiempo Estándar Interno 136.
TD-SCDMA	<i>Time Division Synchronous Code Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Código Síncrono de División de Tiempo.
TE	<i>Terminal Equipment</i> , Equipo Terminal.
TPC	<i>Transmit Power Control</i> , Control de Potencia de Transmisión.
TTI	<i>Time Transmission Interval</i> , Intervalo de Tiempo de Transmisión.
UE	<i>User Equipment</i> , Equipo de Usuario.
UICC	<i>Universal Integrated Circuit Card</i> , Tarjeta de Circuito Integrado Universal.
UL	<i>Uplink</i> , Enlace Ascendente.
UMTS	<i>Universal Mobile Telephone Service</i> , Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles.
USIM	<i>Universal Subscriber Identity Module</i> , Módulo De Identidad de Subscritor Universal.
UWC-136	<i>Universal Wireless Communications</i> , Comunicaciones Inalámbricas Universales 136.
VER	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error Binario.
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i> , Voz sobre el Protocolo de Internet.
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Código Banda Ancha.



INTRODUCCIÓN

La telefonía móvil celular desde su comercialización a finales del siglo XX, evoluciona de modo vertiginoso en cuanto a cobertura, servicios, tecnología y reglamentación. Los primeros en disponer de estos sistemas fueron los países nórdicos, debido a su orografía y demografía [1].

Después llegó la telefonía móvil digital, las agendas personales, laptops y nuevos dispositivos dispuestos a conectarse de manera inalámbrica con otros dispositivos o redes. Finalmente la unión de las comunicaciones y el internet, extrae a la telefonía móvil del ámbito estricto del servicio de voz para convertirla en una tecnología de acceso a datos [2].

Para separar cada una de las etapas de progreso en las comunicaciones móviles se categoriza por generaciones. La primera generación (1G) de telefonía móvil hizo su aparición en 1979, caracterizada por ser analógica y estrictamente para servicios de voz, con una velocidad de 2400 baudios, utilizando para su funcionamiento la técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA, *Frequency Division Multiple Access*) [3]. Las tecnologías más representativas de esta generación fueron: Sistema Avanzado de Telefonía Móvil (AMPS, *Advance Mobile Telephone System*) desarrollados en Bell Labs (USA) y especificado originalmente por el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI, *American National Standards Institute*) como EIA/TIA/IS_3 (1982), Sistema de Comunicación de Acceso Total (TACS, *Total Access Communication*) desarrollado por Vodafone y Cellnet en las instalaciones de General Electric (luego motorola) en Lynchburg, Virginia, USA y Sistema de Comunicación de Acceso Total Japón (JTACS, *Japan Total Access Communication System*) variante japonesa de TACS [4].

La segunda generación (2G) a diferencia de la primera se caracterizó por ser digital con la incorporación de la conmutación de paquetes, permitiendo la reducción en el tamaño, costo y consumo de potencia de los dispositivos móviles, así como nuevos servicios tales como identificador de llamadas, Servicios de Mensajería Corta (SMS, *Short Message Services*), mensajes de voz entre otros. A finales de 2002, casi en todo el mundo se estaba incluido en las redes celulares digitales, y el número de usuarios analógicos era tan sólo de 3% del número total de abonados móviles. Dentro de los sistemas de telefonía celular de segunda generación se destacan: Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM, *Global System for Mobile Communications*), Acceso Múltiple por División de Tiempo Estándar Interno 136 (TDMA IS-136, *Time Division Multiple Access Interim Standard 136*) y Acceso Múltiple por División de Código Estándar Interno 95 (CDMA IS-95, *Code Division Multiple Access Interim Standard 95*).



La necesidad de mayor velocidad, compatibilidad mundial y servicios multimedia llevo a la creación de la Tercera Generación (3G) de comunicaciones móviles, con mayores capacidades para la transmisión de datos en movilidad frente a los sistemas anteriores. La 3G se caracteriza por la convergencia de voz y datos con acceso inalámbrico a internet, aplicaciones multimedia y altas transmisiones de datos, incorporando la transmisión de datos en formato de Protocolo de Internet (IP, *Internet Protocol*), planteado el horizonte de una creciente compatibilidad con los estándares de internet. Entre las tecnologías contendientes de la tercera generación se encuentran: Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS, *Universal Mobile Telephone Service*), CDMA-2000, Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000 (IMT-2000, *International Mobile Telecommunications-2000*), Comunicaciones Inalámbricas Universales 136 (UWC-136, *Universal Wireless Communications*).

Posteriormente, aparece el actual sistema de comunicaciones móviles, las redes de Cuarta Generación (4G) especificada en el año 2008 por el Proyecto Asociación de Tercera Generación (3GPP, *3rd Generation Partnership Project*) versión 8, donde se elimina la conmutación de circuitos, debido a que los servicios de voz son suplidos por el Subsistema Multimedia IP (IMS, *Internet Protocol Multimedia Subsystem*). Uno de los sistemas 4G es la tecnología Evolución de Largo Término (LTE, *Long Term Evolution*) que en comparación con sus antecesoras aumenta la eficiencia espectral y soporta el tráfico de paquetes conmutados con movilidad transparente y calidad de servicio; pero para ello debe asegurar que los recursos radio sean utilizados de manera eficiente mediante mecanismos de Gestión de Recursos Radio (RRM, *Radio Resource Management*), donde el control de potencia es una de las funciones principales para enfrentar los fenómenos presentes en la interfaz aire como multitrayecto, desvanecimiento, efectos de sombra e interferencias, a fin de lograr maximizar la capacidad y garantizar la calidad de servicio en la red.

En este trabajo de grado, se realiza el estudio e implementación de los algoritmos de control de potencia en el Simulador Básico a Nivel de Sistema LTE desarrollado por la Universidad del Cauca, para analizar el efecto que tienen en el desempeño del sistema de comunicaciones móviles LTE, mediante los resultados obtenidos en simulación, variando diferentes parámetros del sistema como la SINR objetivo, tipo de desvanecimiento, número de equipos de usuario, entre otros.



CAPÍTULO I

GENERALIDADES

La tecnología LTE, es un sistema de telecomunicaciones móviles definido por el 3GPP, seguido de la familia de sistemas GSM, Servicio General de Paquetes vía Radio (GRPS, *General Packet Radio Service*), Tasas de Datos Mejoradas para la Evolución de GSM (EDGE, *Enhanced Data Rates for GSM Evolution*) categorizados colectivamente como “Segunda Generación” y los sistemas de “Tercera Generación” que incluyen a UMTS y Alta Velocidad de Paquetes de Datos (HSPA, *High-Speed Packet Access*). Estos estándares tienen diferente interfaz aire y arquitectura de núcleo de Red.

En primera instancia, GSM cuenta con una interfaz aire de Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*) mientras que UMTS está basada en Acceso Múltiple por División de Código (CDMA, *Code Division Multiple Access*) y LTE se basa en Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA, *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*). GSM dispone de la conmutación de circuitos en el núcleo de red, LTE está basado en una arquitectura IP plana, y UMTS es un híbrido, contando en el núcleo de la red con la conmutación de circuitos para el tráfico de voz y conmutación de paquetes para el tráfico de datos.

La evolución de los estándares para las comunicaciones móviles cambia de acuerdo con la evolución red móvil celular, pasando de aplicaciones de voz a utilizar aplicaciones de datos. La Figura 1.1 muestra el desarrollo de los estándares desarrollados por el 3GPP [5].

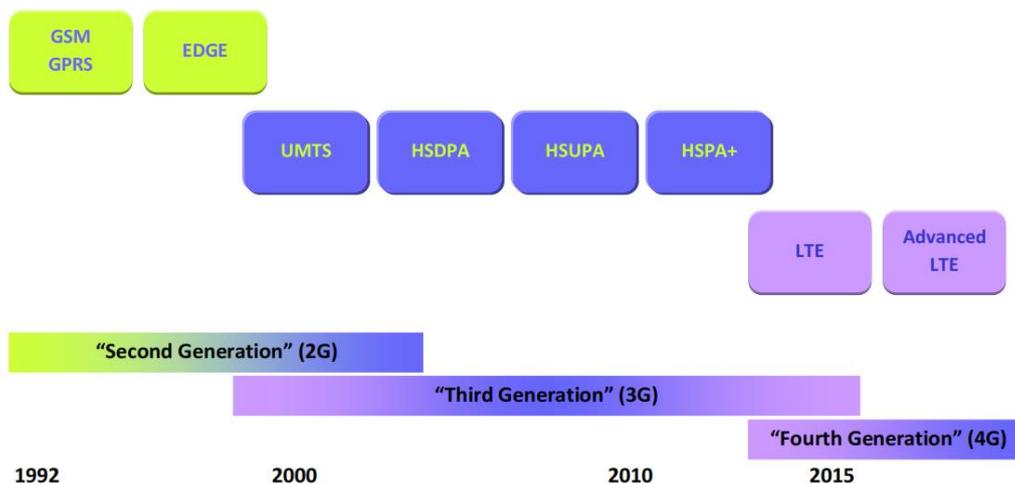


Figura 1.1 Evolución de los Estándares 3GPP. Tomada de [5].

1.1 Requisitos y Objetivos para LTE.

Los requisitos de alto nivel para LTE incluye reducir el costo por bit, mejorar el servicio prestado, implementar el uso flexible de nuevas y existentes bandas de frecuencia, arquitectura de red simplificada con interfaces abiertas y una tolerancia para el consumo razonable de potencia por los terminales. Los requisitos de LTE se encuentra en la recomendación 3GPP TR 25.913 [6].

LTE se especifica para lograr [7]:

- Incrementar la velocidad de datos: Velocidad de datos máxima objetivo en el Enlace Descendente (DL, *Downlink*) de 100 Mbps y en el Enlace Ascendente (UL, *Uplink*) de 50 Mbps para la asignación de espectro de 20 MHz.
- Anchos de banda escalables de 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz tanto en UL y DL.
- Mejorar la eficiencia espectral sobre la versión 6 HSPA de 3 a 4 veces en el DL y 2 a 3 veces en el UL.
- Menor latencia que las tecnologías de tercera generación existentes [8].
- Optimizar el desempeño para bajas velocidades del móvil de 0 a 15 km/h, soportar alto desempeño de 15 a 120 km/h y soporte funcional de 120 a 350km/h.
- Coexistir con los estándares existentes a la vez que evoluciona hacia una red totalmente IP.

1.2 Arquitectura de Red

En 2004, el 3GPP comenzó con el estudio sobre la evolución a largo plazo de UMTS. Con el fin de mantener en competencia los sistemas móviles del 3GPP por 10 años o más, entregando a los futuros usuarios de telefonía móvil altas velocidades de datos y baja latencia, resultando la arquitectura de alto nivel de la Figura 1.2 [9].

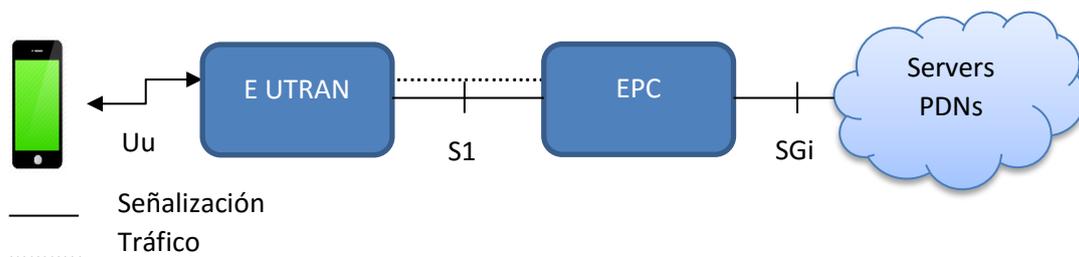


Figura 1.2 Arquitectura de Alto nivel de LTE. Adaptada de [9].

La nueva arquitectura, comprende el Núcleo de Paquetes Evolucionado (EPC, *Evolved Packet Core*) que sustituye el dominio de conmutación de paquetes de GSM y UMTS, distribuyendo todo tipo de información tanto voz como datos solo con la tecnología utilizada para el envío de datos. La nueva arquitectura no

cuenta con la conmutación de circuitos y no existe ninguna equivalencia, manejándose las llamadas de voz sobre IP. La Red de Acceso Radio Terrestre Universal Evolucionada (E-UTRAN, *Evolved Universal Terrestrial Access Network*) gestiona la comunicación radio del EPC con el terminal.

Esta arquitectura concebida para proporcionar sin ninguna ruptura la conectividad IP del usuario con la Red de Paquetes de Datos (PDN, *Packet Data Network*), tanto para el acceso a internet y el servicio de Voz sobre el Protocolo de Internet (VoIP, *Voice over Internet Protocol*) [5] se denomina Sistema de Paquetes Evolucionado (EPS, *Evolved Packet System*) [9].

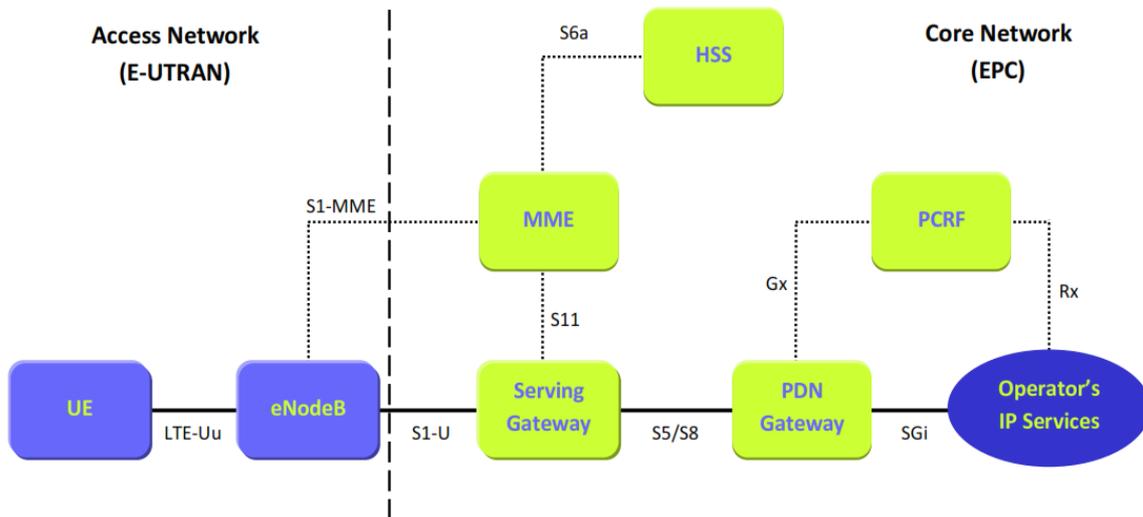


Figura 1.3 Elementos de la Red EPS. Tomada de [5].

Para profundizar en la arquitectura de alto nivel del Sistema de Paquetes Evolucionado que representa la unión de LTE y la Evolución de la Arquitectura del Sistema (SAE, *System Architecture Evolution*), se divide en tres componentes que cuentan con su propia arquitectura interna: el Equipo de Usuario (UE, *User Equipment*), la red de acceso terrestre evolucionada UTRAN (E-UTRAN) y el Núcleo de Paquetes Evolucionado (EPC, *Evolved Packet Core*), el cual a su vez comunica con las redes de paquetes de datos en el mundo exterior, como internet, redes corporativas privadas o el subsistema de multimedia IP.

1.2.1 Equipo de Usuario

Se definen cinco categorías de equipo de usuario en la recomendación TS 36.306 del 3GPP [10], en la tabla 1.1 se muestran las características de cada uno de ellos.

Categoría	1	2	3	4	5
Máxima Velocidad de Datos en DL	10	50	100	150	300
Máxima Velocidad de Datos en UL	5	25	50	50	75
Número de Antenas Receptoras	2	2	2	2	4
Número de Multiplexación espacial MIMO en DL soportado.	1	2	2	2	4
Soporte para 64 QAM en dirección del UL	No	No	No	No	Si

Tabla 1.1 Categorías de UE en LTE. Tomada de [11].

La arquitectura interna del equipo de usuario especificada en la recomendación TS 123.101, es idéntica a la utilizada por UMTS y GSM, ya sea un Smartphone o un móvil de voz, el equipo de usuario se compone de:

Equipo Móvil (ME, *Mobile equipment*): Es el teléfono móvil, encargado de la transmisión radio y aplicaciones del usuario. El ME se divide en:

- Equipo Terminal (TE, *Terminal Equipment*): Se encarga de la gestión del hardware, como el altavoz, micrófono, cámara y de alojar las aplicaciones del usuario.
- Terminación Móvil (MT, *Mobile Termination*): Desempeña las funciones de transmisión radio, autenticación y gestión de movilidad [12], [13].

Tarjeta de Circuito Integrado Universal (UICC, *Universal Integrated Circuit Card*): Conocida como la tarjeta SIM la cual ejecuta la aplicación conocida como Modulo de Identidad de Subscritor Universal (USIM, *Universal Subscriber Identity Module*).

Un USIM almacena los datos específicos del usuario, como el número de teléfono del usuario, la identidad de la red, claves de seguridad [14].

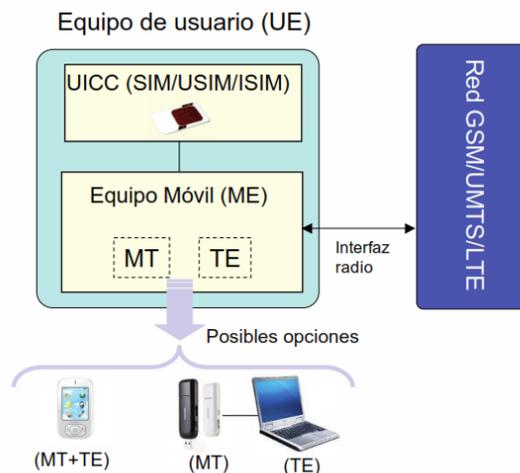


Figura 1.4 Arquitectura Interna del UE. Tomada de [15].

1.2.2 Red de Acceso E-UTRAN

La arquitectura de Red E-UTRAN se describe la recomendación TS 36.300 [16].

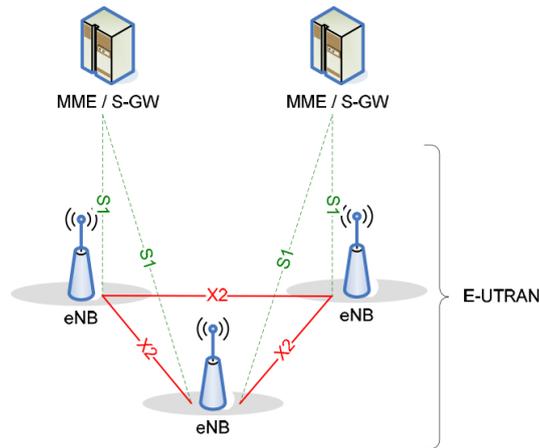


Figura 1.5 Arquitectura E-UTRAN. Tomada de [12].

La E-UTRAN se encarga de la comunicación radio entre el equipo de usuario y el núcleo de paquetes evolucionado. Consiste en la red de Estaciones Base Evolucionadas (eNB, *Evolved Base Stations*) como se ilustra en la Figura 1.5. La arquitectura E-UTRAN es plana, es decir no tiene un controlador centralizado como en UMTS.

Los eNB pueden interconectarse entre sí por medio de la interfaz X2, y al EPC a través de la interfaz S1, más específicamente, a la Entidad de Gestión de la Movilidad (MME, *Mobility Management Entity*) y la Pasarela de Servicio (S-GW, *Serving Gateway*).

La E-UTRAN solo tiene un elemento, el eNB, que integra varias funciones como:

- Gestión de Recursos radio:
 - Control de portadoras radio.
 - Control de admisión radio.
 - Control de conexión de movilidad.
 - Asignación dinámica de recursos a los UEs en UL y DL.
- Compresión de la cabecera IP y encriptado del flujo de datos de usuario.
- Selección de un MME adjunto a un UE cuando la ruta a un MME no puede ser determinada con la información suministrada por el UE.
- Enrutamiento de los datos del plano de usuario hacia la pasarela de servicio S-GW.
- Planificación y transmisión de los mensajes paginados e información de difusión.
- Medición de datos de configuración para la planificación y movilidad [17].

1.2.3 Núcleo de Red EPC.

El núcleo de red (EPC), es el responsable del control en general del UE y el establecimiento de portadoras.

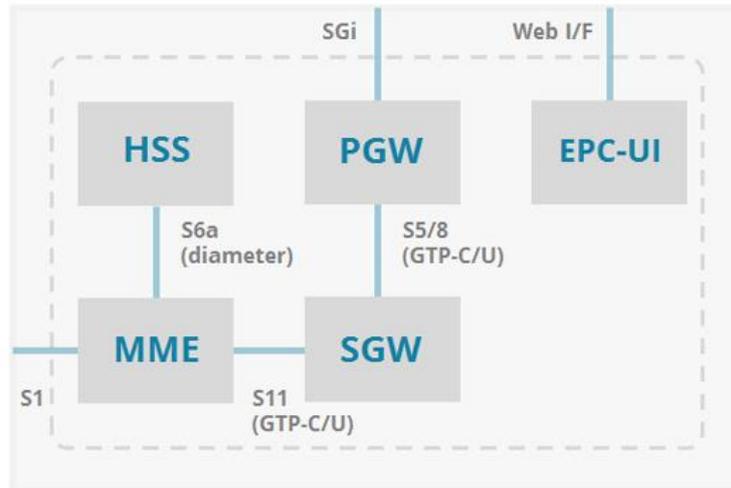


Figura 1.6 Elementos Lógicos del EPC. Tomada de [18].

Comprende los siguientes elementos lógicos:

Pasarela de Servicio (S-GW): Es la puerta de enlace para los paquetes de datos del usuario, responsable del enrutamiento del tráfico entre eNB y la PDN.

Pasarela de Red de Paquetes de Datos (P-GW, PDN Gateway): Responsable de la asignación de direcciones IP a los UE, que permite la comunicación con las redes PDN, utilizando la interfaz SGi.

Entidad de Gestión de la Movilidad: Controla los procesos de señalización entre el UE y el núcleo de la red por medio de mensajes y el Servidor de Abonado Local (HSS, *Home Subscriber Server*). La MME gestiona el establecimiento, mantenimiento y liberación de portadoras, además se encarga del establecimiento de la conexión y la seguridad entre el UE y la red.

Función de Reglas de Control y de Políticas (PCRF, *Policy and Charge Rules Function*): responsable de la gestión de las políticas de tráfico de la red LTE/SAE sobre los flujos de tráfico para la toma de decisiones.

Servidor de Abonado Local (HSS): Base de datos central que contiene información de la cuenta del abonado como: identificación, numeración y dirección de usuario; información de seguridad de usuario para la autenticación y autorización e información de localización de usuario a nivel inter-sistema [5], [14], [15], [18].

1.3 Características de LTE.

LTE proporciona una tecnología capaz de soportar altas velocidades de transmisión, eficiencia espectral, disminución del retardo, flexibilidad en espectro, interacción o compatibilidad con otras tecnologías de acceso radio del 3GPP (GSM, WCDMA/HSPA y Acceso Múltiple por División de Código Síncrono de División de Tiempo (TD-SCDMA, *Time Division Synchronous Code Division Multiple Access*), agregando nuevas características a la red que son definidas en las versiones 8, 9 y 10 del proyecto 3GPP.

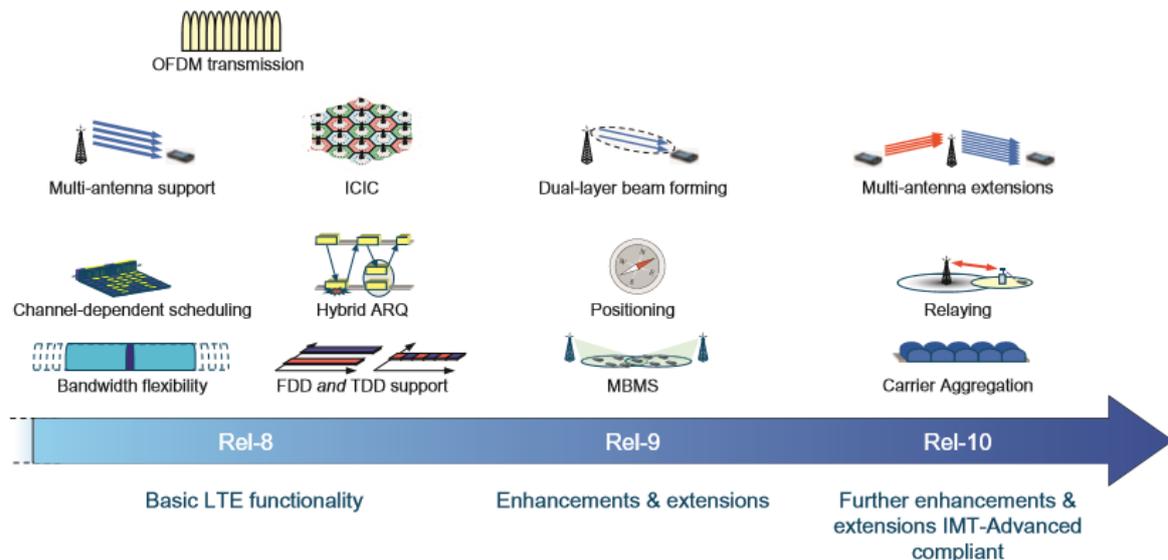


Figura 1.7 LTE y su Evolución. Tomada de [17].

Las características y tecnologías implementadas en LTE son:

1.3.1 Flexibilidad del Espectro.

Dependiendo de los aspectos normativos en cada parte del mundo, el espectro radioeléctrico para la comunicación móvil está disponible en diferentes bandas de frecuencia y anchos de banda, tanto para Duplexación por División de Frecuencia (FDD, *Frequency Division Duplex*) y Duplexación por División de Tiempo (TDD, *Time Division Duplexing*).

LTE puede ser desplegado con anchos de banda que van desde 1.4 MHz a 20 MHz sin cambiar su estructura de trama, incluyendo diferentes arreglos dúplex [19].

En la Tabla 1.2 se muestran los anchos de banda con los que puede ser configurada una celda LTE [9].

Ancho de Banda Total	Número de Bloques de Recursos	Número de Sub-portadoras	Ancho de Banda Ocupado	Banda de Guarda Usual
1.4 MHz	6	72	1.08 MHz	2x0.16 MHz
3 MHz	15	180	2.7 MHz	2x0.15 MHz
5 MHz	25	300	4.5 MHz	2x0.25 MHz
10 MHz	50	600	9 MHz	2x0.5 MHz
15 MHz	75	900	13.5 MHz	2x0.75 MHz
20 MHz	100	1200	18 MHz	2x1 MHz

Tabla 1.2 Anchos de Banda Soportados para celda LTE. Tomada de [9].

Un aspecto importante de LTE es la posibilidad del acceso radio tanto en el espectro pareado y no pareado, soportando tanto el arreglo dúplex basado en división de tiempo y de frecuencia, además de soportar half-duplex FDD en el terminal, donde la transmisión y recepción están separadas tanto en tiempo y frecuencia. En la Figura 1.8 se ilustran los diferentes arreglos dúplex soportados por LTE [20].

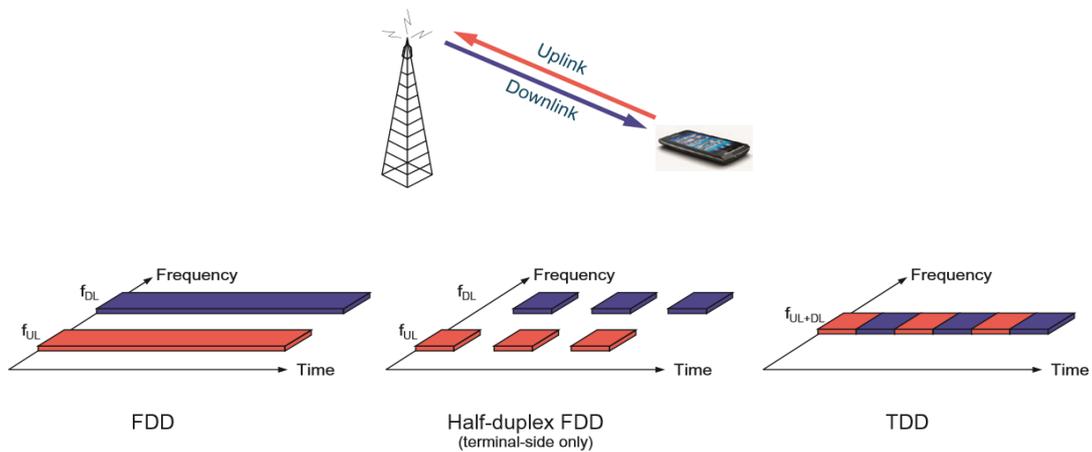


Figura 1.8 Duplexación por División de Tiempo y Frecuencia. Tomada de [17].

1.3.2 Bloque de Recurso y Trama de LTE.

Para asignar el ancho de banda para canales y señales físicas sin depender del ancho de banda, LTE utiliza una estructura bidimensional (tiempo, Frecuencia).

Dentro de la estructura jerárquica de recursos de LTE se encuentra la trama radio de LTE de 10 ms. Dividida en 10 sub-tramas de 1 ms. Cada sub-trama se divide en dos ranuras de tiempo de 0.5 ms de duración, compuestas de 7 símbolos de Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM, *Orthogonal*

Frequency Division Multiplexing) en el dominio del tiempo y 12 sub-portadoras en el dominio de la frecuencia.

Una ranura de tiempo de 7 símbolos con 12 sub-portadoras se denomina Bloque de Recurso Físico (PRB, *Physical Resource Block*) el cual está compuesto por la estructura modular más pequeña en LTE llamada Elemento de Recurso (RE, *Resource Element*), asociado a una sub-portadora en el dominio de la frecuencia y un símbolo OFDM en el dominio del tiempo [21], [22].

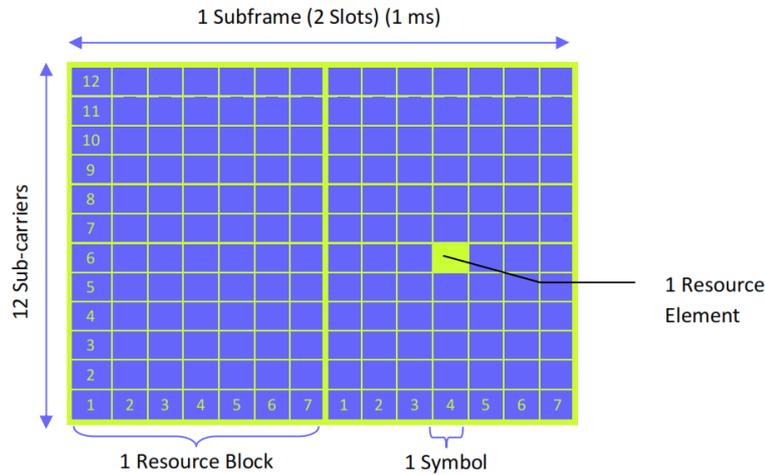


Figura 1.9 Bloque de Recuso y Elemento de Recurso. Tomada de [22].

1.3.3 Esquema de Transmisión

La interfaz aire de LTE está basada en Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA) para el DL y Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única (SC-FDMA, *Single Carrier Frequency Divison Multiple Access*) para la parte del UL como se muestra en la Figura 1.10.

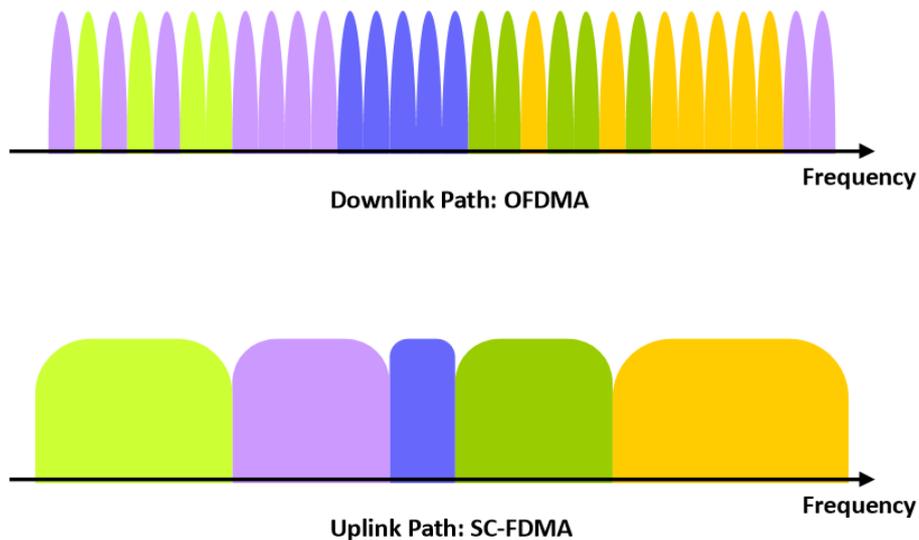


Figura 1.10 Tecnología de Acceso LTE. Tomada de [5].

OFDMA subdivide el ancho de banda disponible en un número de subportadoras de banda estrecha las cuales son 'mutuamente ortogonales' (es decir, no se interfieren entre sí), donde cada una de ellas lleva la información de forma independiente. Esto permite flexibilidad en:

- Capacidad de transmisión planificada en el dominio del tiempo y frecuencia, donde a los usuarios se puede asignar un número de subportadoras en diferentes instantes de tiempo.
- Capacidad para operar en diferentes anchos de banda de canal, dependiendo de la asignación del espectro sin afectar los parámetros fundamentales del sistema o del diseño del equipo.
- Permite técnicas de planificación de frecuencias flexible.
- Permite el diseño de receptores de baja complejidad.
- Aumenta la robustez del canal radio.
- Permite la integración de tecnologías avanzadas de antena fácilmente como Múltiple Entrada Múltiple Salida (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*) y formación de haz para aumentar la capacidad y robustez de las señales radio.

Debido a la alta Relación Potencia Pico a Potencia Promedio (PAPR, *Peak to Average Power Ratio*) de OFDMA, LTE implementa SC-FDMA para la ruta del enlace ascendente con prefijo cíclico, reduciendo los costos y la complejidad del diseño del terminal móvil [5], [22].

1.3.4 Tecnologías Multi-antena

En LTE, las tecnologías Multi-Antena son un elemento clave para conseguir alta eficiencia espectral, incrementar la velocidad de datos, capacidad y cobertura del sistema LTE. Estas tecnologías, especialmente Múltiple Entrada Múltiple Salida (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*), usa la multiplexación espacial en el canal de propagación inalámbrico para incrementar el tráfico y la robustez de la señal radio [5].

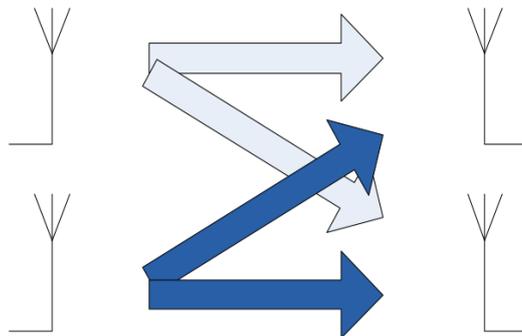


Figura 1.11 Múltiple Entrada Múltiple Salida Multiplexación Espacial. Tomada de [5].



En el DL, cuatro técnicas de transmisión Multi–Antena son soportadas: diversidad en trasmisión, multiplexación espacial en lazo cerrado, multiplexación espacial en lazo abierto y formación de haz. La multiplexación espacial puede ser usada para soportar Único-Usuario Múltiple Entrada Múltiple Salida (SU-MIMO, *Single-User Multiple Input Multiple Output*), donde múltiples flujos de datos son transmitidos para un usuario simultáneamente en el mismo tiempo y frecuencia, o Multi-Usuario MIMO (MU-MIMO, *Multi-User Multiple Input Multiple Output*), donde múltiples flujos de datos son transmitidos para diferentes usuarios simultáneamente en el mismo tiempo y frecuencia. En el UL, SU-MIMO no es posible ya que el UE únicamente transmite por una sola antena, sin embargo, MU-MIMO puede ser soportado [23].

1.3.5 Coordinación de la Interferencia Inter-celda (ICIC, *Inter-cell Interference Coordination*)

El esquema de acceso radio de LTE proporciona ortogonalidad entre los usuarios de la misma celda, tanto en DL y UL, pero no entre las celdas vecinas. La ICIC es una técnica integrada dentro de las funciones del planificador, usada para mantener bajo control la interferencia que reciben los usuarios en el borde de la celda a través de mensajes de información de carga enviados por la interfaz X2 entre los eNBs, para coordinar la potencia de transmisión y la asignación de recursos [24].

1.3.6 Gestión de Recursos Radio (RRM, *Radio Resource Management*)

El objetivo de la RRM es asegurar el uso eficiente de los recursos radio, aprovechando las técnicas de adaptación y servir al usuario acorde a los parámetros de calidad de servicio configurados. En la Figura 1.12 se tiene la vista general de la arquitectura de protocolos del plano de control y de usuario, mapeando las funcionalidades de la RRM en las diferentes capas de la pila de protocolos de LTE [25].

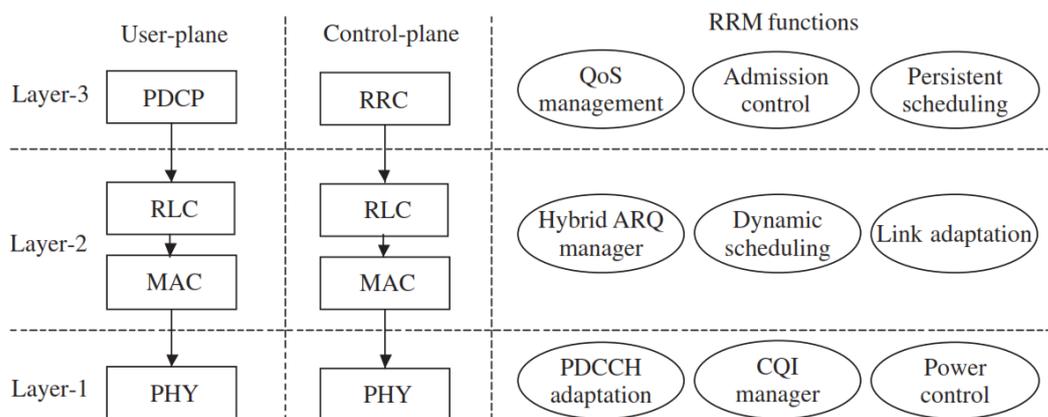


Figura 1.12 Funciones de RRM. Tomada de [25].



Entre las principales funcionalidades de RRM se encuentra en la capa física el Control de Potencia (PC, *Power Control*), encargado de determinar la potencia de transmisión necesaria en cada momento, de las diferentes sub-portadoras asignadas a los diferentes usuarios. Se utiliza principalmente en el enlace ascendente para compensar las pérdidas de propagación de cada usuario, utilizando una combinación de control en lazo abierto y lazo cerrado [26].

CAPÍTULO II

CONTROL DE POTENCIA

El control de potencia hace referencia a la configuración inteligente, en el equilibrio de las potencias de transmisión con respecto a los recursos radio disponibles en el sistema, con el objetivo de mantener la calidad del enlace correspondiente a la calidad de servicio deseada, que viene definida por la Tasa de Error de Bloque (BLER, *Block Error Rate*) o la Tasa de Error Binario (BER, *Bit Error Rate*), en contra de la necesidad de minimizar la interferencia a otros usuarios del sistema y maximizar la duración de la batería del equipo terminal.

Esta funcionalidad es realizada por la gestión de recursos radio, específicamente en la unidad de adaptación de enlace [27].

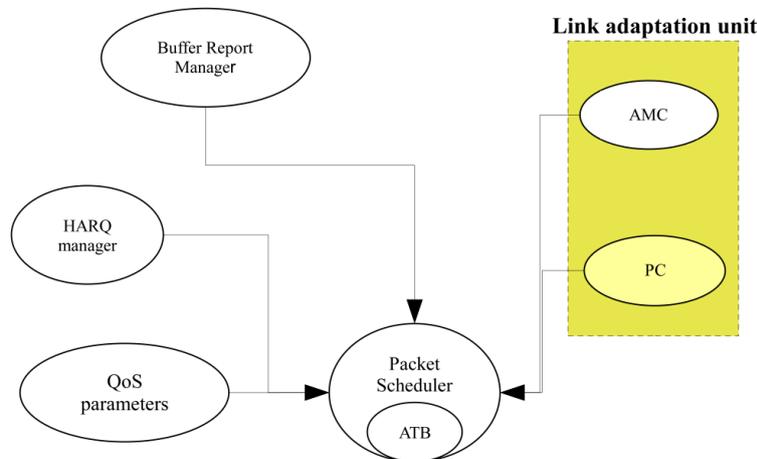


Figura 2.1 Subconjunto de Funcionalidades de RRM. Tomada de [24].

Para lograr su objetivo, el PC tiene que adaptarse a las características intrínsecas del canal de propagación radio, incluyendo pérdidas de propagación, desvanecimiento lento y rápido, además de superar las interferencias de otros usuarios, dentro de la misma celda y de las celdas vecinas [28].

2.1 Funciones del Control de Potencia

Las funcionalidades principales en las que participa el control de potencia son:

Gestión de la Interferencia: Debido a la naturaleza de las emisiones inalámbricas, las señales interfieren entre sí. En LTE se utiliza el control de potencia para reducir la interferencia inter-celda [24].



Gestión de la Energía: Debido a la potencia limitada de la batería del UE, la conservación de la energía es primordial para el tiempo de vida de los dispositivos móviles y la red. El control de potencia aumenta la duración de la batería de los UEs controlando la potencia de transmisión.

Gestión de la Conectividad: Debido a la incertidumbre y variación en el tiempo del canal inalámbrico, el eNB debe recibir un mínimo nivel de señal del UE para mantener la conexión. El control de potencia ayuda a sostener la conexión entre el UE y el eNB a pesar de las variaciones del canal.

El PC puede afectar sustancialmente la capacidad y la calidad percibida de los sistemas inalámbricos celulares; independientemente del modo de acceso, es necesario para combatir la interferencia inter-celda, co-canal que surge de la reutilización de frecuencias [29].

En LTE, el control de potencia para el DL determina la Energía de Transmisión por Elemento de Recurso (EPRE, *Energy per Resource Element*) y se conoce la potencia disponible en todo momento para la transmisión, por ello para el eNB no es crítico distribuir toda la potencia disponible uniformemente entre los Bloques de Recursos [15].

En el enlace ascendente, LTE es ortogonal por diseño, es decir, no presenta ninguna interferencia entre los usuarios de la misma celda, mientras que si existe interferencia inter-celda que depende de la posición el terminal móvil, si este se encuentra cerca de la celda vecina, más fuerte es la interferencia para esta celda.

Por tanto, los terminales que están más lejos de la celda vecina pueden transmitir con una mayor potencia que los terminales que están cerca de está. Además, existe una correlación entre la proximidad de la celda de servicio y la distancia de las celdas vecinas [19]. Por lo expuesto se hace necesario en un sistema de comunicaciones inalámbricas realizar control de potencia.

2.2 Técnicas de Control de Potencia.

Los algoritmos de control de potencia de acuerdo con la señalización y arquitectura de control se dividen en dos grupos:

Control de Potencia Centralizado: Un controlador central, cuenta con toda la información sobre las conexiones establecidas, ganancias del canal en cada momento y controla todas las potencias transmitidas por las estaciones móviles en la red. Este esquema requiere de una amplia señalización de control sujeta a retrasos y congestión, no es fácil de implementar, pero contribuye con el diseño de los esquemas de control de potencia distribuidos.

Control de Potencia Distribuido: Requiere de varios controladores descentralizados, donde cada uno controla la potencia de los transmisores bajo su gestión, generalmente situados en la misma celda, En este caso, el algoritmo depende solo de información local, como la SINR o ganancia del canal para

tomar una decisión de control. Esta técnica es fácil de implementar, por su naturaleza descentralizada [30], [31].

De acuerdo a las variaciones del canal que deben ser compensadas las técnicas de control de potencia se dividen en dos tipos:

Control de Potencia Lento: Diseñado para compensar las variaciones lentas del canal (pérdidas de propagación dependientes de la distancia, pérdidas de antena, y desvanecimiento por sombra).

Control de Potencia Rápido: diseñado para compensar las variaciones rápidas del canal (desvanecimiento rápido) [27].

Relacionado con la información enviada al móvil para establecer su potencia de transmisión los algoritmos de PC son:

Control de Potencia en Lazo Abierto (OLPC, *Open Loop Power Control*): La potencia es establecida en el terminal móvil, usando parámetros internos y mediciones obtenidas a partir de las señales enviadas desde el eNB, sin retroalimentación del mismo.

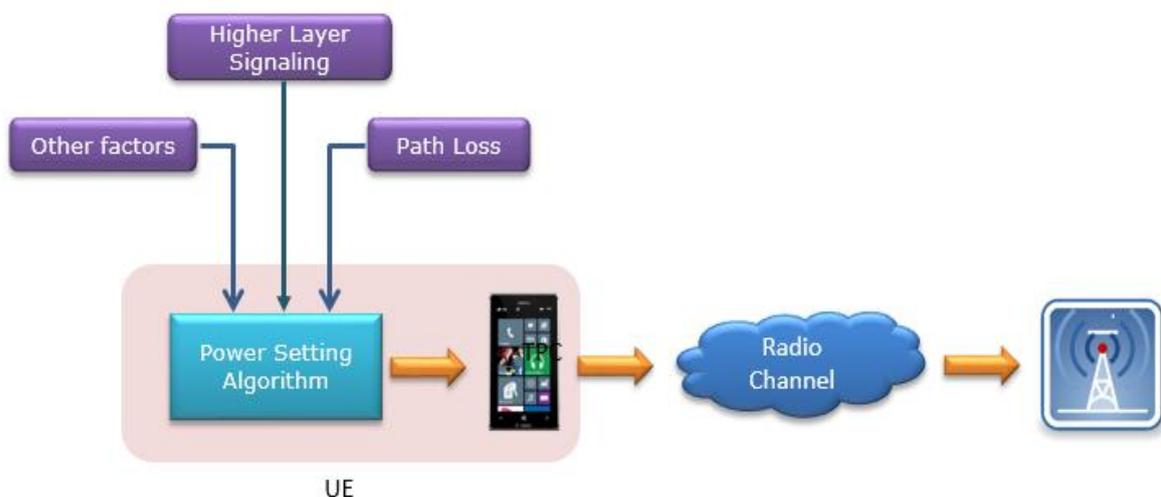


Figura 2.2 Control de Potencia en Lazo Abierto. Tomada de [32].

Control de Potencia en Lazo Cerrado (CLPC, *Closed Loop Power Control*): El UE al establecer la conexión con OLPC, para mantenerla se retroalimenta al eNB, con información que luego es usada para corregir la potencia de transmisión del equipo usuario.

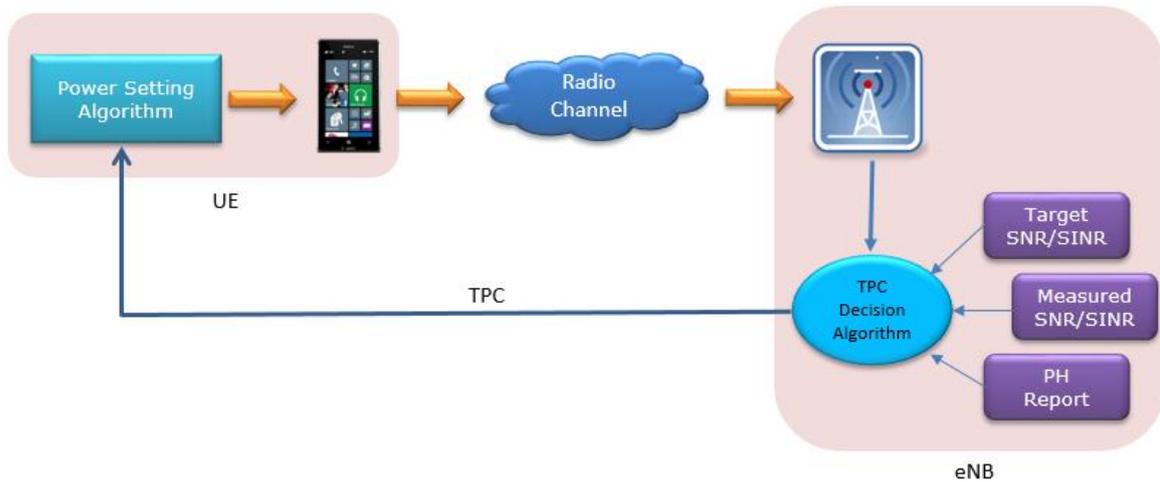


Figura 2.3 Control de Potencia en Lazo Cerrado. Tomada de [27].

De acuerdo con el enlace que lleva a cabo el control de potencia puede ser:

Control de Potencia en UL: la estación base indica al UE la potencia con que debe transmitir para alcanzar la calidad de servicio deseada.

Control de Potencia en DL: la estación base ajusta su potencia dependiendo del área de cobertura y el tráfico.

Teniendo en cuenta el parámetro utilizado para realizar el control de potencia, puede ser:

Basado en Intensidad de Potencia: El receptor mide constantemente la intensidad de la señal proveniente del transmisor y de acuerdo al valor medido y el valor de potencia deseado, se envía un comando para aumentar o disminuir la potencia de transmisión.

Basados en SINR: la entidad receptora mide la SINR, para ajustar la potencia del transmisor y alcanzar la QoS deseada.

Basados en BER: El receptor compara el número promedio de bits erróneos con respecto a una secuencia de bits original, para indicar al transmisor el incremento o disminución de su potencia.

En resumen, las características de las diferentes técnicas de control de potencia se presentan en la Tabla 2.1.



De acuerdo a cómo se recopila la información en el sistema móvil celular		
Centralizado	Distribuido	
<ul style="list-style-type: none"> Recopilación global de información. Cálculo simultáneo de potencia para todos los radioenlaces. Equipos complejos, sobrecarga al eNB. 	<ul style="list-style-type: none"> Recopilación local de la información. Cálculo iterativo de potencia para cada radioenlace. Tiempo de convergencia es un aspecto crítico. 	
Teniendo en cuenta el enlace que lleva a cabo el control de potencia		
En el enlace de subida	En el enlace de bajada	
<ul style="list-style-type: none"> El control de potencia lo realiza el UE. Mitiga interferencia. Evita valores de potencia arbitrariamente altos. Incrementa tiempo de vida de las baterías de los dispositivos móviles. 	<ul style="list-style-type: none"> El control de potencia lo realiza el eNB. Permite ajustar zonas de cobertura para equilibrar tráfico. Reduce pérdidas debidas a propagación y desvanecimiento. 	
De acuerdo a las variaciones del canal		
Lento	Rápido	
<ul style="list-style-type: none"> Compensa las pérdidas provocadas por la configuración del terreno. 	<ul style="list-style-type: none"> Compensa las pérdidas provocadas por multirayecto. 	
De acuerdo al parámetro de medición utilizado		
Intensidad de potencia	SINR	BER
<ul style="list-style-type: none"> Receptor mide la intensidad de la señal y la compara con un valor de potencia objetivo. 	<ul style="list-style-type: none"> Receptor mide SINR hasta alcanzar un nivel de QoS deseado. Realimentación positiva. 	<ul style="list-style-type: none"> Receptor compara secuencia de Bits con respecto a una secuencia original. Sistema necesita retardo para acumular muestras.
Dependiendo de la existencia o no de realimentación		
Lazo abierto	Lazo cerrado	
<ul style="list-style-type: none"> No requiere realimentación desde el receptor. Ajuste de potencia teniendo en cuenta intensidad de la señal proveniente del receptor. Reacciona más rápidamente a cambios del canal. 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere realimentación desde el receptor. El receptor monitorea la potencia de la señal recibida. Reacciona lentamente a los cambios del canal. 	

Tabla 2.1 Clasificación de las Técnicas de Control de Potencia. Tomada y Adaptada de [28].



2.3 Control de Potencia en LTE

El control de potencia establece los niveles de potencia de salida de los transmisores, de los eNB en el DL y de las estaciones móviles en el UL, con el objetivo de mejorar la capacidad del sistema, la cobertura, la calidad del usuario (velocidad de datos o calidad de voz) y reducir el consumo de energía. Para ello los mecanismos de control de potencia normalmente buscan maximizar la potencia recibida de las señales deseadas, al tiempo que limitan la interferencia generada.

En el DL en LTE, el ajuste de potencia es semi-estático; el eNB ofrece su capacidad de potencia fija por PRB asignados para el transporte, es decir, cada PRB tiene la misma potencia de transmisión y la potencia de transmisión es máxima cuando todos los PRBs han sido asignados.

En LTE, el UL es básicamente ortogonal¹ y no hay necesidad de control de potencia rápido para evitar el problema cerca lejos, presentado en los sistemas WCDMA. El esquema de control de potencia en UL emplea una combinación del control de potencia en lazo abierto y en lazo cerrado. Esto en teoría, requiere menos retroalimentación que un esquema únicamente en lazo cerrado, ya que la realimentación es necesaria, solo en caso que la propia estimación de UE no sea satisfactoria [33], [34].

2.3.1 Procedimiento de Control de Potencia en UL.

El control de potencia consta de dos partes: el PC en lazo abierto donde el UE basado en las mediciones de las pérdidas de propagación de la señal proveniente del eNB, estima la potencia de transmisión para iniciar la transferencia de datos y el PC en lazo cerrado en donde el eNB a través del Canal Físico de Control del Enlace Descendente (PDCCH, *Physical Downlink Control Channel*) envía correcciones para aumentar o disminuir la potencia de transmisión, añadiendo estas correcciones a las mediciones de lazo abierto para calcular la potencia de transmisión total de UE.

El UE controla su potencia de salida para mantener la Densidad Espectral de Potencia (PDS, *Power spectral density*) transmitida, potencia por Hz, constante e independiente del ancho de banda asignado (# de PRBs) [35].

¹ Ortogonal: Indica que las subportadoras no se mezclan entre si.

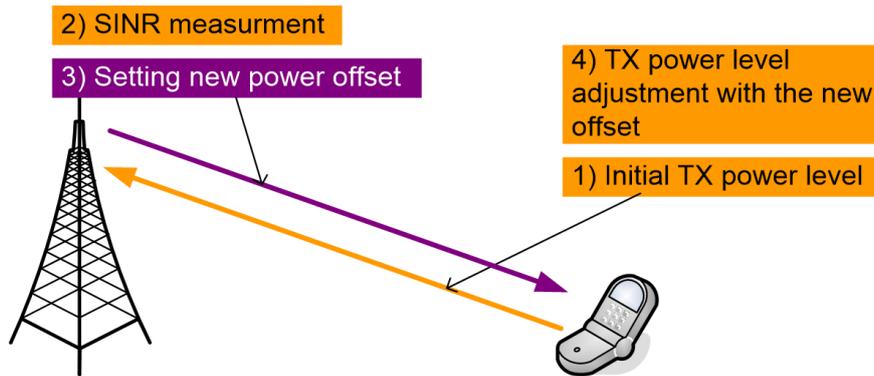


Figura 2.3 Control de Potencia en LTE. Tomada de [35].

El control de potencia en LTE se realiza para el Canal Físico Compartido en el Enlace Ascendente (PUSCH, *Physical Uplink Shared Channel*), el Canal Físico de Control del Enlace Ascendente (PUCCH, *Physical Uplink Control Channel*) y Señal de Referencia de Sondeo (SRS, *Sounding Reference Signal*). Las expresiones para cada uno de estos canales siguen los mismos principios básicos y se pueden considerar como la suma de dos términos principales [34]:

$$PRB = POB + CD \quad (2.1)$$

donde,

PRB: Potencia por Bloque de Recurso.

POB: Punto de Operación Básico en lazo Abierto.

CD: Compensación Dinámica.

A continuación se especifica cada uno de los procedimientos de control de potencia, definidos para los canales físicos en el enlace ascendente en la recomendación TS 136.213 del 3GPP [36].

2.3.1.1 Canal Físico Compartido en el UL (PUSCH)

El ajuste de la potencia de transmisión del UE para la transmisión del canal físico compartido en el UL P_{PUSCH} en la subtrama i se define por:

$$P_{PUSCH}(i) = \min \{ P_{CMAX}, 10 \log_{10} (M_{PUSCH}(i)) + P_{OPUSCH}(j) + \alpha(j) \cdot PL + \Delta_{TF}(i) + f(i) \}_{[dBm]} \quad (2.2)$$

Donde,

P_{CMAX} es la máxima potencia de transmisión permitida por el terminal, definida en la recomendación TS 36.101 [10].

$M_{PUSCH}(i)$ es el ancho de banda asignado al PUSCH, expresado en número de bloques de recursos válidos para la subtrama i .



$P_{O_{PUSCH}}(j)$ es el parámetro compuesto de la suma de un componente específico de la celda emitido por el eNB y un parámetro específico del UE.

$\alpha(j)$ es el factor de compensación fraccional de las pérdidas de propagación. Es un parámetro específico de la celda de 3 bits.

$$\alpha \in \{0.0, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0\}$$

PL son las pérdidas de propagación del enlace descendente estimadas por el UE en dB con base a la Potencia Recibida de la Señal de Referencia (RSRP, *Reference Signal Received Power*).

$\Delta_{TF}(i)$ es un parámetro específico del UE que ajusta el nivel de potencia de acuerdo a la modulación y tasa de codificación (MCS) para llegar a la SINR deseada.

$f(i)$ es un valor de corrección específico del UE aplicado para el ajuste de potencia en lazo cerrado [36], [23].

2.3.1.2 Canal Físico de Control en el UL (PUCCH)

El ajuste de la potencia de transmisión en el UE para el canal físico de control en el enlace ascendente P_{PUCCH} en la subtrama i es definido por:

$$P_{PUCCH}(i) = \min\{P_{CMAX}, P_{O_{PUCCH}} + PL + h(n_{CQI}, n_{HARQ}) + \Delta_{FPUCCH}(F) + g(i)\}_{dBm} \quad (2.3)$$

El control de potencia del PUCCH, no utiliza el factor de compensación fraccional ya que requiere de la compensación total para encontrar la SINR objetivo representada por el parámetro $P_{O_{PUCCH}}$. Sin embargo, debido a los diferentes formatos del PUCCH se tienen diferentes requerimientos de SINR, por ello es necesario considerar los siguientes parámetros de ajuste:

$h(n_{CQI}, n_{HARQ})$ es un valor dependiente del formato del PUCCH, donde n_{CQI} corresponde al número de bits de información de la calidad del canal y n_{HARQ} es el número de bits HARQ. Cuando solamente bits de reconocimiento HARQ son transmitidos, este parámetro se configura en cero.

$\Delta_{FPUCCH}(F)$ es el parámetro de ajuste de potencia basado en el formato del PUCCH transmitido. El ajuste se realiza respecto a la potencia requerida para el PUCCH formato 1a.

$g(i)$ Es un valor de ajuste específico del UE dado por los comandos de Control de Potencia de Transmisión (TPC, *Transmit Power Control*) [23].

2.3.1.3 Señal de Referencia de Sondeo (SRS)

El ajuste de la potencia de transmisión del UE para la SRS en la subtrama i está dado por:



$$P_{SRS}(i) = \min\{P_{CMAX}, P_{SRSOFFSET} + 10\log_{10}(M_{SRS}) + P_{OPUSCH}(j) + \alpha(j) \cdot PL + f(i)\}_{[dBm]} \quad (2.4)$$

Donde,

M_{SRS} es el ancho de banda de transmisión del SRS en la subtrama i expresado en número de bloques de recursos.

$P_{SRSOFFSET}$ es un parámetro específico del UE de 4 bits configurado semi-estáticamente por las capas superiores [36].

2.4 Selección de las Técnicas de Control de Potencia

Para seleccionar las técnicas de control de potencia a implementar en el simulador, se tiene en cuenta su clasificación y la forma en que se aplican en la tecnología LTE. En la Tabla 2.2 se muestran las técnicas seleccionadas para la implementación de los algoritmos de control de potencia y el motivo de su selección.

Teniendo en cuenta el enlace que lleva a cabo el control de potencia	
En el enlace de subida	En LTE se encuentra presente la interferencia inter-celda debido al reuso de frecuencias, siendo necesario que el UE realice el control de potencia, para mitigar la interferencia, evitar valores de potencia altos e incrementar el tiempo de vida de las baterías de los dispositivos móviles.
De acuerdo a cómo se recopila la información en el sistema móvil celular	
Distribuido	En la arquitectura de la Red E-UTRAN es plana y cada eNB se encarga de controlar las potencias de los transmisores bajo su gestión.
De acuerdo a las variaciones del Canal	
Lento y Rápido	El canal de propagación puede presentar variaciones rápidas o lentas que deben ser compensadas, por ello se seleccionan las dos técnicas.
Dependiendo de la existencia o no de realimentación	
Lazo abierto y Lazo cerrado	Teniendo en cuenta el procedimiento para el control de potencia en UL, es necesario la implementación lazo abierto para estimar la potencia de transmisión inicial del UE y del lazo cerrado para el control de la potencia de transmisión por parte del eNB.
De acuerdo al parámetro de medición utilizado	
SINR	En LTE el eNB mide la SINR recibida para realizar el ajuste de la potencia de transmisión de los UEs.

Tabla 2.2 Selección de Tecnicas de Control de Potencia. Fuente: Por Autor.



Los algoritmos de control de potencia se realizan para el enlace ascendente, utilizando la estimación de la potencia de transmisión del UE y la retroalimentación del eNB de servicio, el cual recibe la señal del UE y mide la SINR para ajustar la potencia.

A continuación, se plantea la metodología de desarrollo utilizada en la implementación de los algoritmos teniendo en cuenta las técnicas de control de potencia seleccionadas y el funcionamiento de la tecnología LTE.

CAPÍTULO III.

METODOLOGÍA DE DESARROLLO

3.1 INTRODUCCIÓN

El proceso de diseño e implementación de los algoritmos de control de potencia en el Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE, se desarrolla bajo la metodología del Proceso Unificado de Rational (RUP, *Rational Unified Process*) [37].

RUP es una metodología iterativa e incremental, donde el trabajo se divide en partes más pequeñas o mini proyectos, los cuales incorporan parte de las especificaciones y se ven como una iteración que va incrementando la funcionalidad del sistema de manera progresiva. En cada iteración se genera un ejecutable y se incluye: requerimientos, análisis, diseño, implementación, pruebas y evaluación como se muestra en la Figura 3.1 [37], [38].

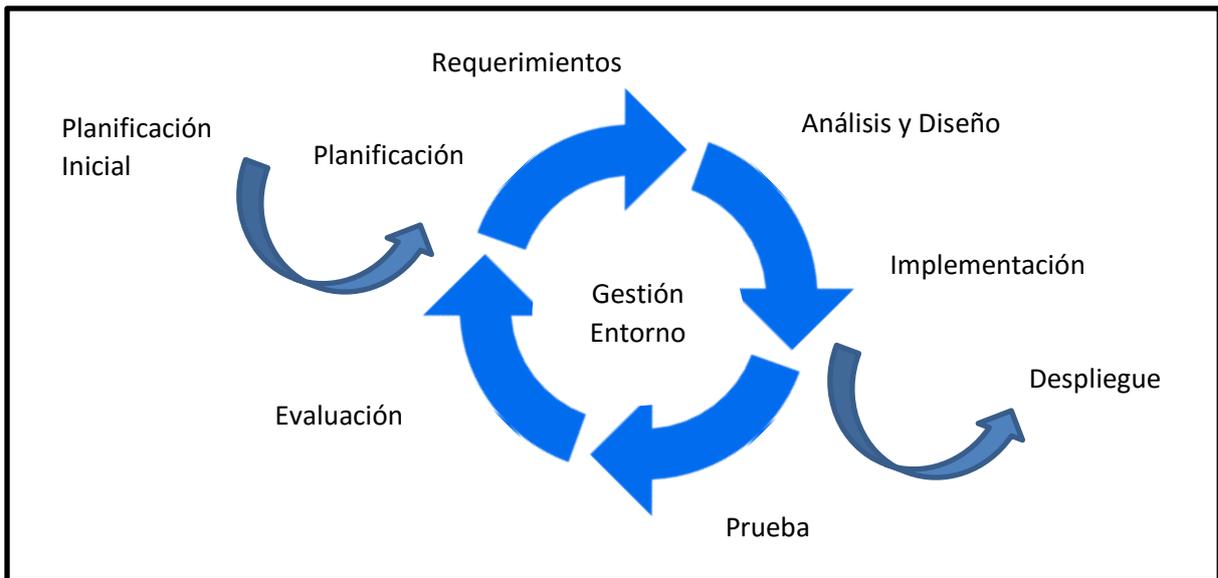


Figura 3.1 Iteración en RUP. Tomada y Adaptada de [38].

3.2 REQUERIMIENTOS

Implementar en la tercera versión del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE un algoritmo de Control de Potencia y generar gráficas estadísticas que evidencien su efecto en el desempeño del sistema LTE.



3.2.1 Requerimiento Funcionales

Las funcionalidades para conseguir los resultados a partir de las entradas en el simulador son:

- Elección de diferentes parámetros del sistema LTE (radio de celda, número de UE por sector, ancho de banda, tipo de antena, modelo de propagación).
- Creación de escenario de estudio.
- Cálculo de la SINR y *throughput* en el enlace descendente.
- Cálculo de la potencia de transmisión del UE con control de potencia en lazo abierto.
- Cálculo de la potencia de transmisión del UE con control de potencia en lazo cerrado.
- Cálculo de la probabilidad de servicio en la celda.
- Planificación de los recursos radio en el enlace ascendente.
- Identificación de Interferencia de las diferentes celdas.
- Despliegue de resultados obtenidos en el enlace ascendente del desempeño del sistema LTE.

3.2.2 Requerimientos no Funcionales

Las características que debe cumplir el sistema para responder adecuadamente a todos los requerimientos funcionales y permitir la interacción entre el usuario y el sistema son:

- Despliegue de interfaz de usuario.
- Funcionamiento adecuado del simulador en equipos que cuente con el software Matlab compatible con la versión 8.1.
- Usabilidad del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE.

3.3 ANÁLISIS Y DISEÑO

Se realiza el análisis y diseño de los algoritmos de control de potencia para la implementación e integración con el Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE.

En este proceso se realizan los diagramas de flujo de cada algoritmo de control potencia, presentando de manera secuencial el procedimiento y se define donde serán implementados en el simulador para satisfacer los requerimientos planteados.

3.3.1 Modelo del Sistema

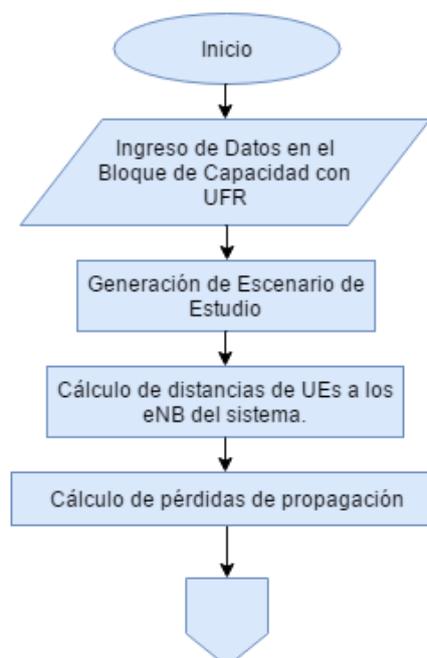
El Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE de la Universidad de Cauca, cuenta con características fijas; su estructura se divide en tres bloques que permiten la simulación de la red con cuatro celdas, donde los equipos de usuario (UE) se distribuyen de manera aleatoria en ella.

La Figura 3.2 muestra los Bloques con que cuenta el simulador y las principales entradas y salidas del bloque de capacidad [39], [40], [41].



Figura 3.2 Entradas y Salidas del Bloque de Capacidad del Simulador. Fuente: Por autor.

En la versión 4 del simulador, se adiciona al bloque de cálculo de capacidad, los algoritmos de control de potencia en lazo abierto y cerrado. La Figura 3.3 muestra el proceso realizado por este bloque.



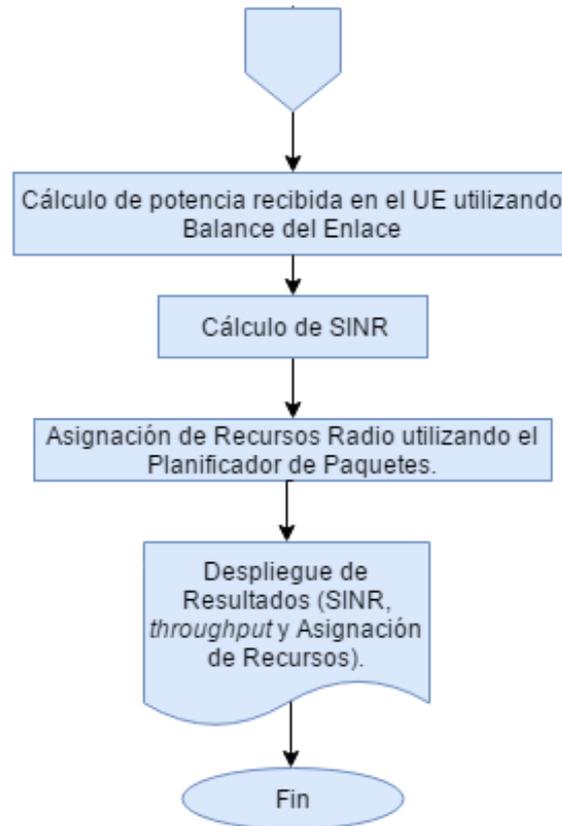
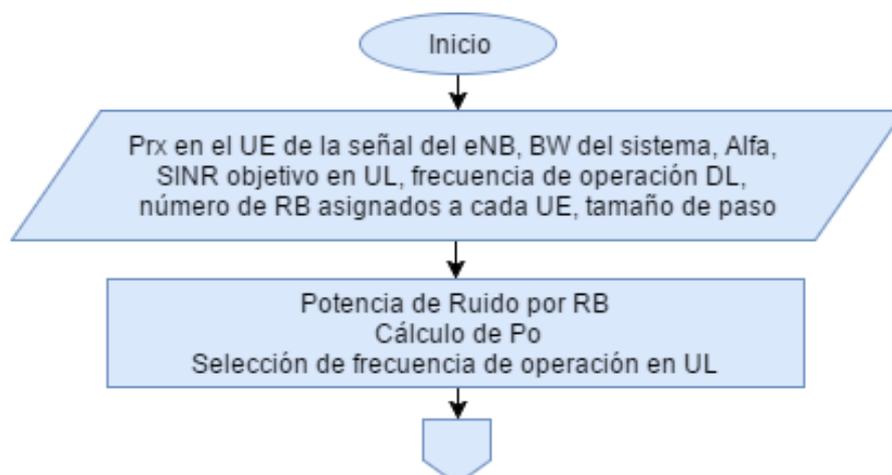


Figura 3.3 Pasos realizados para la obtención de resultados en el Bloque de Capacidad utilizando UFR. Fuente: Por Autor.

A partir de los datos y cálculos generados por el bloque de capacidad UFR, se diseñan los diagramas de flujo de los algoritmos de control de potencia a implementar.

3.3.2. Diseño de Control de Potencia en Lazo Abierto

Teniendo en cuenta el proceso realizado por el bloque de capacidad, se muestra en la Figura 3.4 el diagrama de flujo del algoritmo de Control de potencia en lazo abierto, con las entradas y salidas más relevantes.



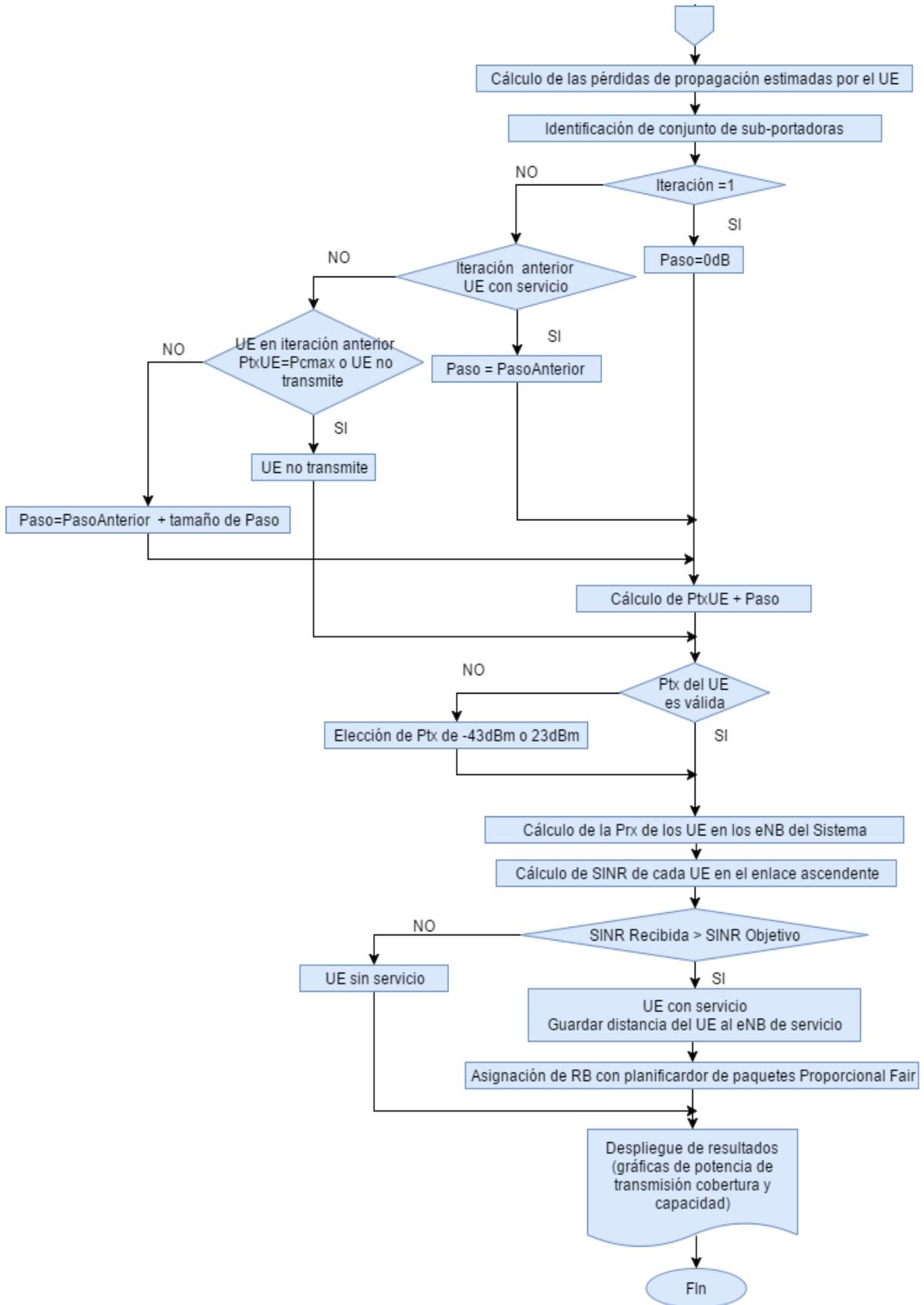


Figura 3.4 Diagrama de Flujo del algoritmo de Control de Potencia en Lazo Abierto. Fuente: Por Autor.

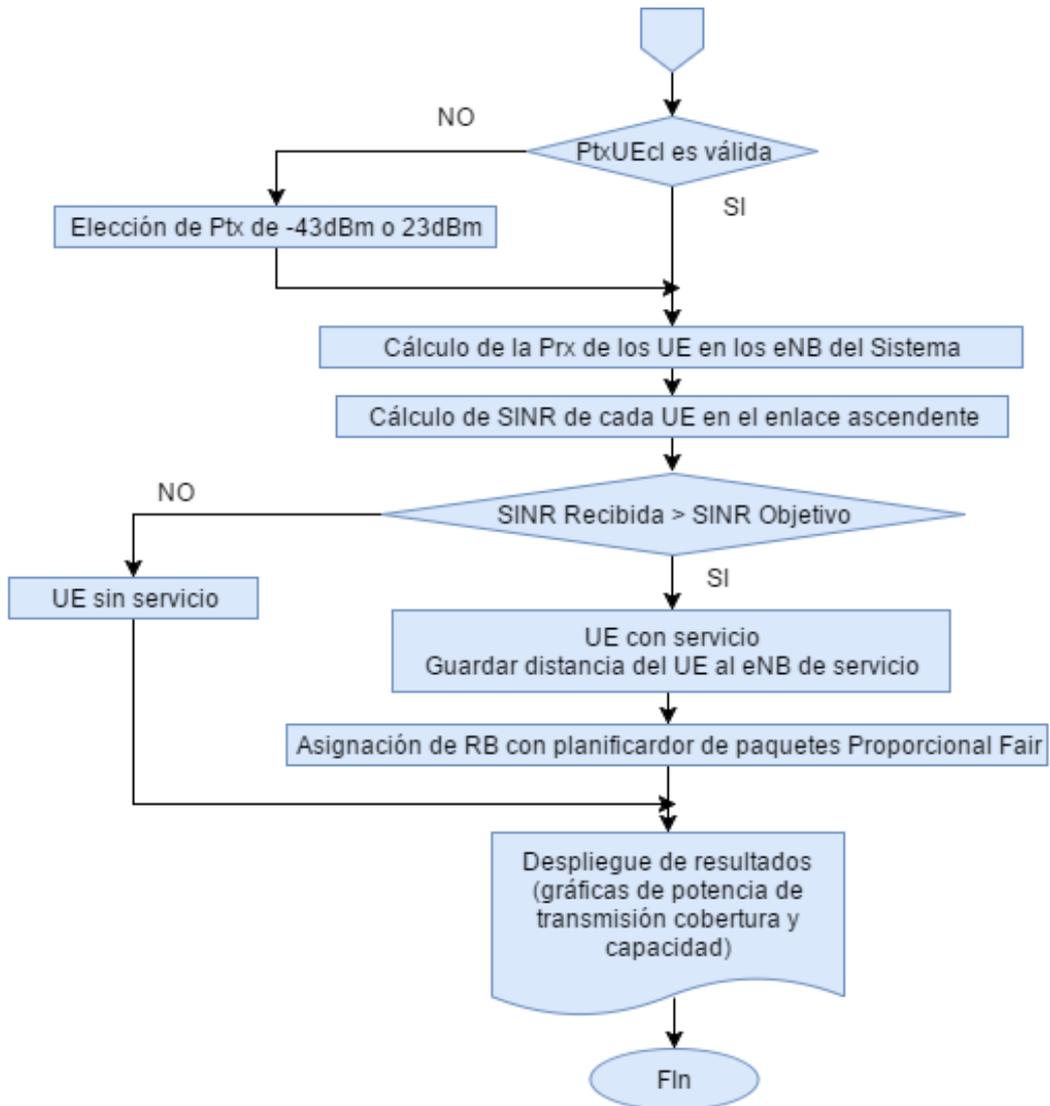


Figura 3.5 Diagrama de Flujo del algoritmo de Control de Potencia en Lazo Cerrado. Fuente: Por Autor.

3.4 IMPLEMENTACIÓN

Para la implementación del algoritmo de control de potencia en lazo abierto, se detallan los procesos más relevantes definidos dentro del diagrama de flujo.

3.4.1 Cálculo de Potencia de Ruido por RB

Este valor es constante para el sistema y se calcula teniendo en cuenta el ancho de banda de un RB que es 180 KHz, con la ecuación 3.1.

$$P_n = 10 \log_{10}(1.38 * 10^{-23}) + 10 \log_{10}(290^\circ) + 10 \log_{10}(180.000 \text{ Hz}) \quad (3.1)$$

3.4.2 SINR Objetivo

Para determinar la SINR objetivo en el enlace ascendente, puesto que no se encuentra especificada en TS 136.23 del 3GPP, se toma en cuenta la Figura 3.6 tomada de la ETSI TR 136.942 [42], donde la línea punteada verde muestra el *throughput* alcanzado para diferentes valores de SINR en el enlace ascendente. A fin de cubrir el rango de la gráfica se escogen siete valores de SINR objetivo para el enlace ascendente, que son utilizados como parámetros de entrada por el usuario en la interfaz del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE. Estos valores son: -10, -5, 0, 5, 10, 15, y 20 dB.

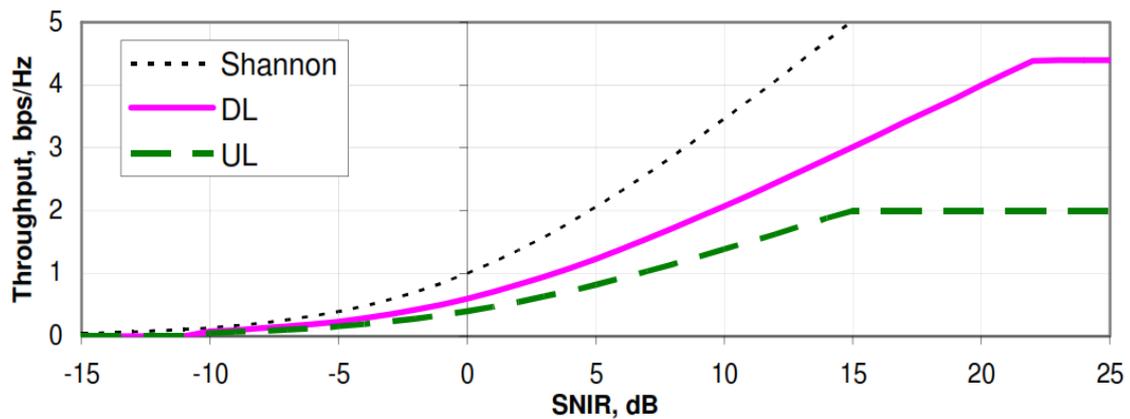


Figura 3.6 *Throughput* vs SINR. Tomada de [42].

3.4.3 Cálculo de P_o

Parámetro específico del eNB, se calcula basado en la SINR objetivo del sistema y el factor de compensación de la red LTE utilizando la ecuación 3.2, este parámetro indica la potencia que el eNB espera recibir del UE.

$$P_o = \alpha * (SINR_{objetivo} + P_n) + (1 - \alpha) * P_{cmax} \quad (3.2)$$

Donde,

P_n : Potencia de ruido por RB.

α : Factor de compensación de las pérdidas de propagación.

P_{cmax} : Potencia máxima que el UE puede transmitir (23dBm).

3.4.4 Pérdidas de Propagación

La estimación de las pérdidas de propagación por parte del UE se realiza comparando la potencia de la señal recibida y la potencia de la señal transmitida por el eNB.

$$PL = Potencia\ Señal\ transmitida\ eNB - Potencia\ Señal\ Recibida\ en\ UE \quad (3.3)$$

3.4.5 Asignación de Conjunto de Sub-portadoras al UE

Una vez realizada la asignación de Bloques de Recursos en el enlace descendente por el planificador de paquetes, se identifica el conjunto de sub-portadoras de cada UE, teniendo en cuenta la Tabla 3.1, donde el número de sub-portadoras se relaciona con el ancho de banda del sistema [43].

BW MHz	3	5	10	15	20
# RB	15	25	50	75	100
Sub-portadoras	180	300	600	900	1200

Tabla 3.1 Relación entre el ancho de banda y el número de Sub-portadoras. Tomada de [43].

Para este proceso se realiza la asignación contigua de sub-portadoras, que permite que cada RB sea identificado con un número indicador del conjunto de 12 sub-portadoras que está utilizando. Gráficamente esta identificación se realiza de acuerdo con la Figura 3.6 para todas las celdas del sistema.

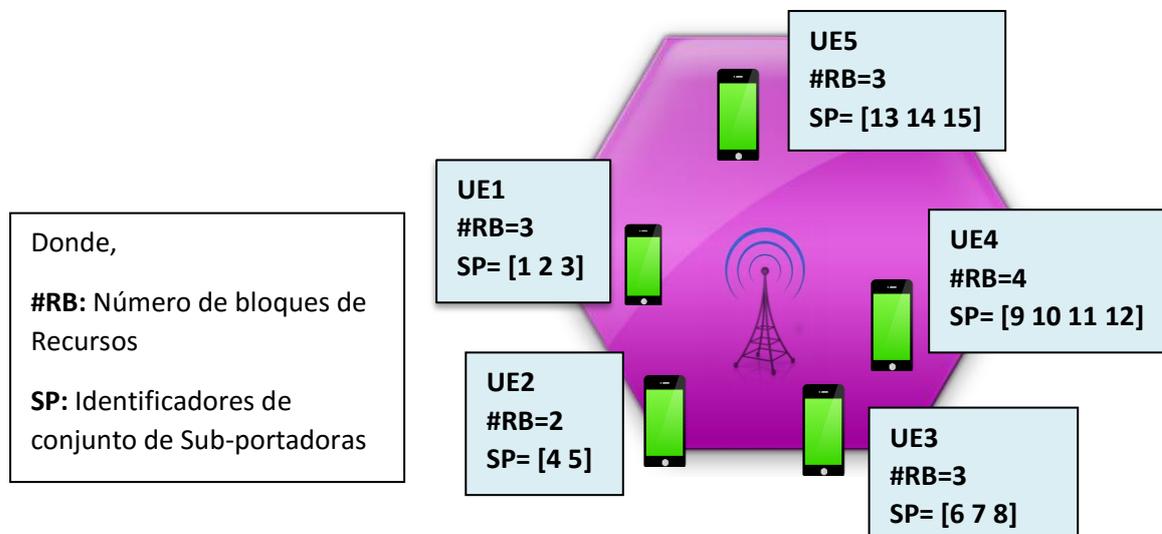


Figura 3.7 Asignación de conjunto de Sub-portadoras. Fuente: Por Autor.

Como se muestra en la Figura 3.6, si se maneja un ancho de banda de 3 MHz, se tienen 15 RB que pueden ser asignados por el planificador de paquetes en el enlace descendente; una vez el planificador define el número de bloques de recursos para cada UE, se identifica el sub conjunto de portadoras.

En esta parte se selecciona ordenadamente a los UEs y se crea un vector con los identificadores de los conjuntos de sub-portadoras para cada UE, en este caso el UE1 tiene 3 RB asignados, por lo tanto, se identifica a los conjuntos de sub portadoras con los índices 1, 2 y 3, para el UE2 con 2 RB asignados, se identifica a los conjuntos de sub portadoras con los índices 4, 5 y así sucesivamente para los UEs siguientes en la misma celda. Este procedimiento de asignación se realiza en todas las celdas para posteriormente identificar la interferencia en el sistema.



3.4.6 Obtención de la Potencia de Transmisión del UE

Utilizando el procedimiento estandarizado por el 3GPP para el establecimiento de la potencia de transmisión mencionado en la sección 2.3 se obtiene la expresión 3.4 para la implementación del control de potencia con lazo abierto.

$$P_{txUE} = 10\log_{10}(M) + P_o + \alpha * PL \quad (3.4)$$

Donde el factor de compensación (α) es seleccionado desde la interfaz gráfica del simulador por el usuario, M es el número de bloques de recursos asignados por el planificador de paquetes en el DL y P_o es establecido según la sección 3.4.2.

3.4.7 Validación de la Potencia de Transmisión del UE

Debido a las limitaciones del terminal móvil, este no puede transmitir por debajo de -43dBm ni por encima de 23dBm, por ello, es necesario verificar que la potencia calculada este acorde a las capacidades del dispositivo móvil utilizando la comparación de la expresión 3.5.

$$P_{txUE} = \begin{cases} -43 \text{ dBm} & \text{si } P_{txUE} < -43\text{dBm} \\ P_{txUE} & \text{si } -43\text{dBm} < P_{txUE} < 23\text{dBm} \\ 23 \text{ dBm} & \text{si } P_{txUE} > 23\text{dBm} \end{cases} \quad (3.5)$$

3.4.8 SINR y Ruido del Sistema

Para determinar la SINR recibida en el eNB, se realiza el balance del enlace ascendente utilizando la ecuación 3.6.

$$P_{rxenB} = P_{txUE} + G - L \quad (3.6)$$

donde,

G: Ganancia de antena del eNB (18dBi).

L: Pérdidas de propagación en el enlace ascendente calculadas acorde al modelo de propagación establecido en el sistema.

Al obtener las potencias recibidas en el eNB del UE, se identifica las interferencias de los mismos, mediante los identificadores de conjunto de sub portadoras.

Como se muestra en la Figura 3.7, para identificar la interferencia que tienen los UEs de la celda de estudio, por ejemplo, para el UE2, se compara que usuarios del sistema cuentan con índices de conjuntos de sub-portadoras iguales, en este caso los usuarios interferentes son el UE2 y UE3 de la celda vecina 1 y el UE2 y

UE3 de la celda vecina 2, debido a que estos tienen al menos un índice de conjuntos de sub-portadoras igual al de UE2 de la celda de estudio.

Este procedimiento se repite para todos los usuarios de la celda de estudio y posteriormente se nombra a una celda vecina como celda de estudio para realizar el mismo procedimiento.

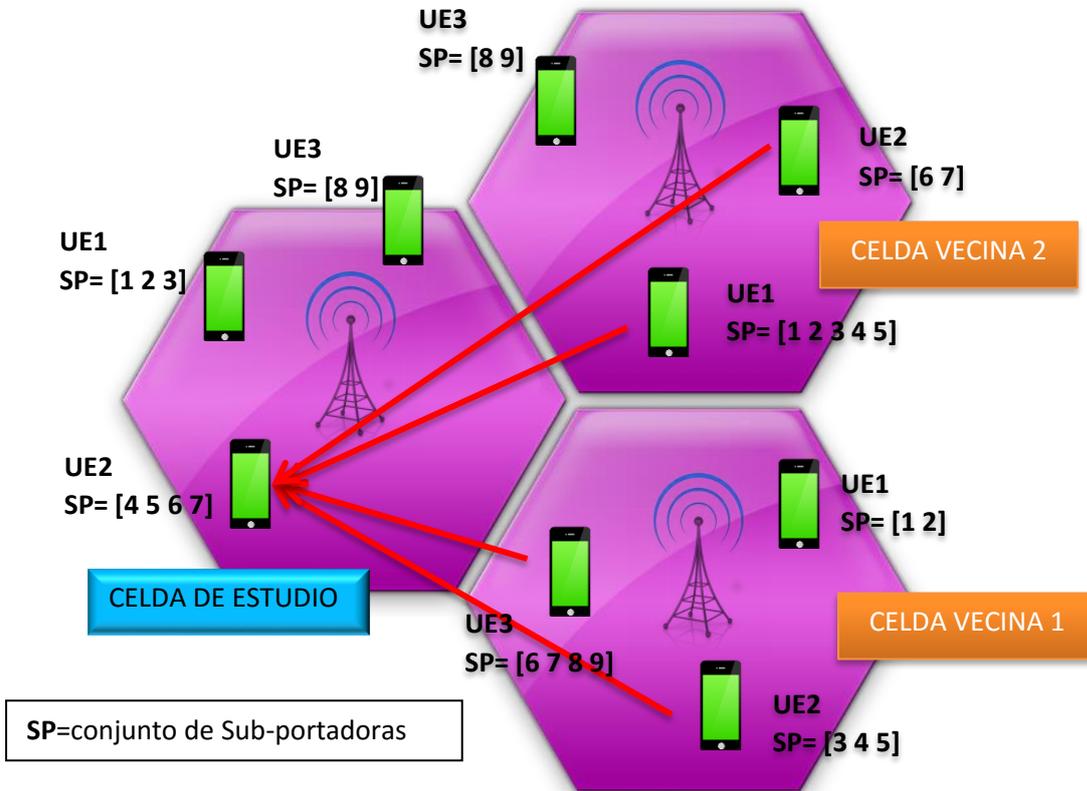


Figura 3.8 Escenario de Identificación de UEs interferentes para un UE de la celda de estudio. Fuente: Por Autor.

Identificada la interferencia de todos los usuarios del sistema, se calcula la potencia de la señal interferente de cada UE, realizando la sumatoria de las potencias interferentes con la ecuación 3.7.

$$Potencia_{total\ interfeferente} = \sum_{i=1}^n Potencia_{interfente}(i) \quad (3.7)$$

donde,

n: Número de equipos de usuario interferentes.

Para determinar la SINR en el eNB de cada UE, se realiza el cálculo el ruido térmico generado por los UE del sistema con la expresión 3.8.

$$N_{sys} = 10\log_{10}(1.38 * 10^{-23}) + 10\log_{10}(290^{\circ}) + 10\log_{10}(BW * RB) \quad (3.8)$$

donde,

BW: Ancho de banda de un bloque de recursos (180 KHz).

RB: Número de Bloques de Recursos que han sido asignados al UE.

Finalmente, la SINR es obtenida con la ecuación 3.9.

$$SINR = P_{txUE} - 10\log_{10}(Potencia_{total\ interferente} + Ruido_{sistema}) \quad (3.9)$$

3.4.9 Calculo de Radio de Cobertura y Servicio

Para determinar que usuarios tienen o no servicio, se compara la SINR del UE con la SINR objetivo, si la SINR recibida es mayor a la SINR objetivo, se asume que el usuario puede acceder a la red.

Obtenidos los usuarios que tienen servicio, se encuentra el radio de cobertura buscando el UE con servicio más alejado al eNB de la celda de servicio como se muestra en la Figura 3.9.

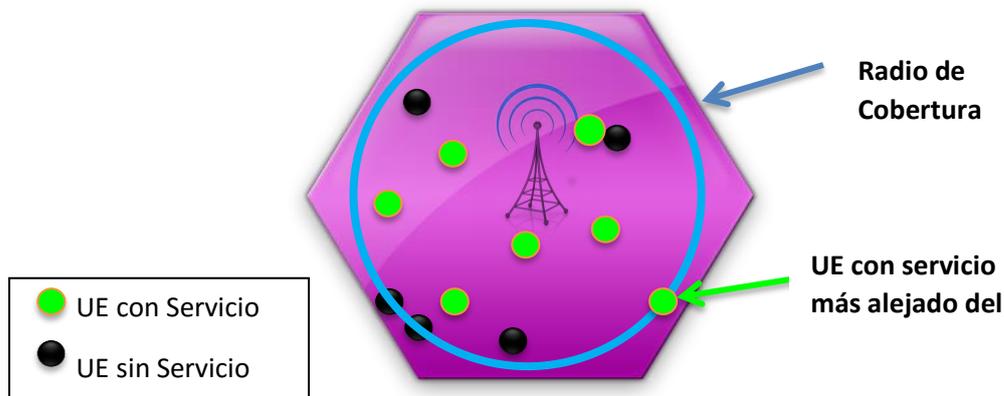


Figura 3.9 Obtención del Radio de Cobertura. Fuente: Por Autor.

3.4.10 Planificación de Recursos Radio

En LTE uno de los planificadores utilizados por los operadores de telefonía móvil es el planificador de Proporcionalidad Justa (PF, *Proportional Fair*), el cual busca dar un mínimo de calidad de servicio a los usuarios con condiciones pésimas de canal y asignar mayor cantidad de bloques de recursos a los usuarios con las mejores condiciones. Por ello se selecciona esta estrategia básica que asegura la planificación de prioridades para diferentes servicios teniendo en cuenta las condiciones del canal de propagación [44].

Para el enlace ascendente, se asigna inicialmente 1 RB a los UEs que tienen servicio en la celda; luego utilizando la SINR recibida y los valores de prioridad de asignación para cada celda, el planificador de paquetes reparte los RBs restantes entre los UEs con servicio.



3.4.11 Obtención del TBS y CQI a partir de la SINR

A partir de la Tabla 3.2 obtenida de [23] se mapea la SINR de referencia requerida al índice indicador de canal correspondiente.

Índice CQI	Modulación	Eficiencia Espectral (bps/Hz)	SINR de Referencia (dB)
0	Fuera de Rango		
1	QPSK	0.15	-6.7
2	QPSK	0.23	-4.7
3	QPSK	0.38	-2.3
4	QPSK	0.60	0.2
5	QPSK	0.88	2.4
6	QPSK	1.18	4.3
7	16QAM	1.48	5.9
8	16QAM	1.91	8.1
9	16QAM	2.41	10.3
10	64QAM	2.73	11.7
11	64QAM	3.32	14.1
12	64QAM	3.90	16.3
13	64QAM	4.52	18.7
14	64QAM	5.12	21.0
15	64QAM	5.55	22.7

Tabla 3.2 Tabla de CQI y SINR de referencia requerida. Tomada de [23].

Con el CQI se encuentra el índice del esquema de modulación y codificación utilizando la Tabla 3.3 tomada de TS 136.101 [45].

Índice CQI	Modulación	Tasa de Codificación Objetivo	Esquema MCS.1 Imcs
0	Fuera de Rango		
1	QPSK	0.0762	0
2	QPSK	0.1172	0
3	QPSK	0.1885	2
4	QPSK	0.3008	4
5	QPSK	0.4385	6
6	QPSK	0.5879	8
7	16QAM	0.3691	11



8	16QAM	0.4784	13
9	16QAM	0.6016	16
10	64QAM	0.4551	18
11	64QAM	0.5537	21
12	64QAM	0.6504	23
13	64QAM	0.7539	25
14	64QAM	0.8525	27
15	64QAM	0.9258	27

Tabla 3.3 Mapeo de CQI al índice del Esquema de Modulación y Codificación.
 Tomada y Adaptada de [45].

Finalmente se realiza el mapeo del índice del esquema de modulación y codificación al índice del formato de transporte para el PUSCH, con la Tabla 3.4 tomada de [36].

Índice MCS	Orden de Modulación	Índice TBS
I_{mcs}	Q_m	I_{TBS}
0	2	0
1	2	1
2	2	2
3	2	3
4	2	4
5	2	5
6	2	6
7	2	7
8	2	8
9	2	9
10	2	10
11	4	10
12	4	11
13	4	12
14	4	13
15	4	14
16	4	15
17	4	16
18	4	17
19	4	18
20	4	19
21	6	19
22	6	20
23	6	21
24	6	22
25	6	23



26	6	24
27	6	25
28	6	26
29	Reservado	
30		
31		

Tabla 3.4 Índice del TBS y Modulación para el PUSCH. Tomada de [36].

A partir del índice del tamaño del bloque de transporte y el número de bloques de recursos asignados a cada equipo usuario se realiza el mapeo del tamaño de bloque de transporte, utilizando la Tabla 7.1.7.2.1-1 de la TS 36.213 [36].

3.4.12 Resultados

Los resultados obtenidos a partir la aplicación de los algoritmos de control de potencia son: gráfica de cobertura, grafica de potencia de transmisión del UE y SINR recibida en cada iteración, histogramas y Función de Distribución Acumulada (CDF, *Cumulative Distribution Function*) de SINR, *throughput*, potencia recibida y potencia transmitida.

3.4.12.1 Gráfica de Cobertura

El algoritmo implementado realiza los cálculos iterativamente para dar la probabilidad de servicio de los UEs del sistema y los radios promedio de cobertura como se muestra en la Figura 3.10.

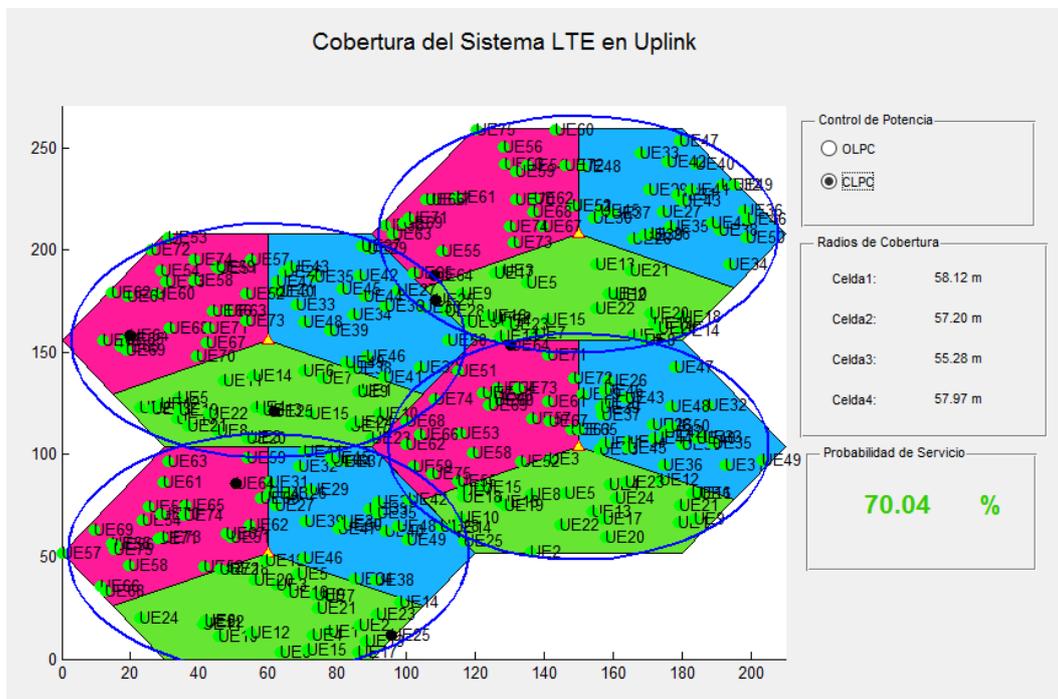


Figura 3.10 Gráfica de Cobertura. Fuente: Por Autor.

3.4.12.2 Gráficas de SINR, *Throughput*, Potencia Recibida y Potencia Transmitida

Las gráficas de SINR, *throughput*, potencia recibida y potencia transmitida se muestran en la Figura 3.11, utilizando el histograma para observar el número de ocurrencia de los valores obtenidos y la CDF que identifica la probabilidad acumulada de las variables de estudio.

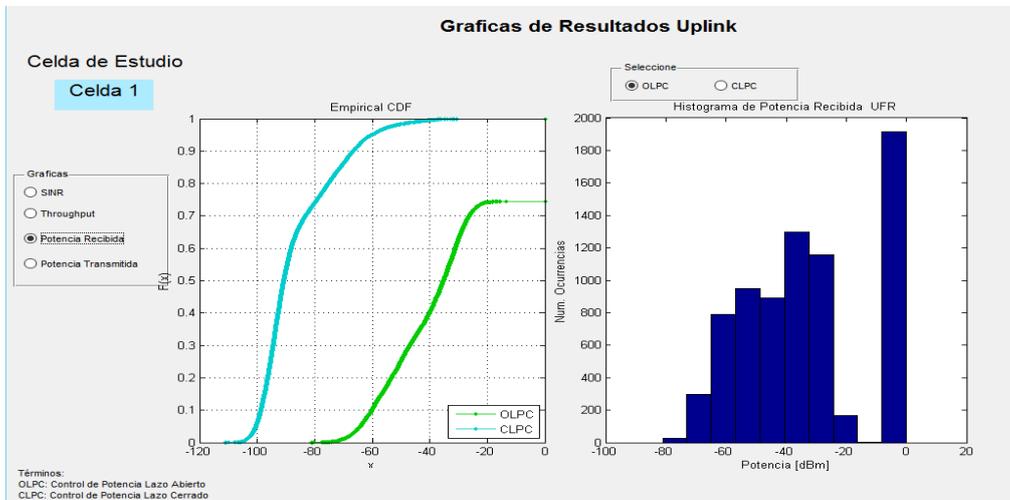


Figura 3.11 Gráficas de SINR, *Throughput* y Potencia recibida. Fuente: Por Autor.

3.4.12.3 Gráfica de Potencia Transmitida.

Para conocer los valores de potencia de transmisión y la SINR del UE con los algoritmos de control de potencia en lazo abierto o lazo cerrado, se utiliza la interfaz de la Figura 3.12. Esta permite elegir los UEs de diferentes celdas para graficar su potencia de transmisión y SINR en cada iteración realizada por el simulador LTE.

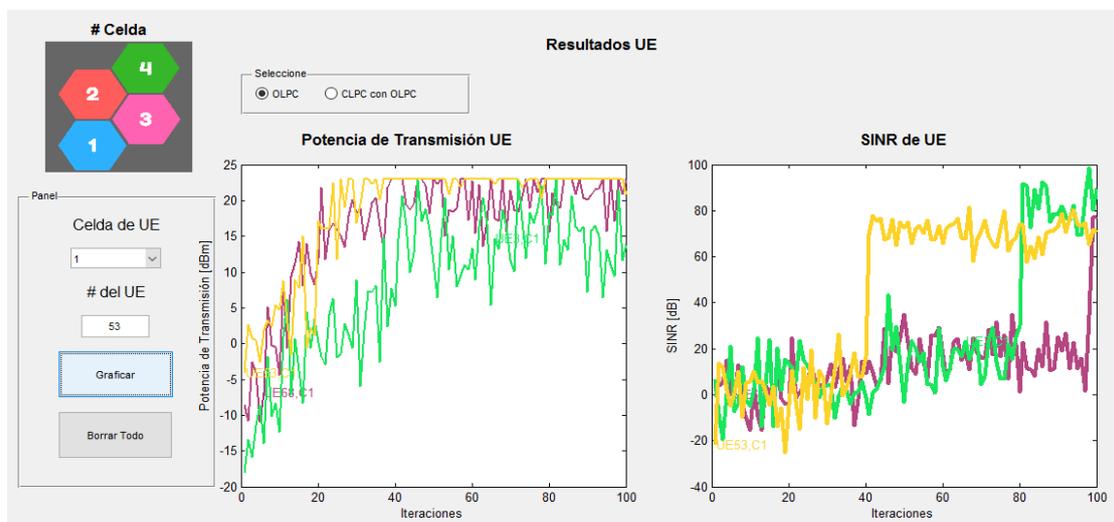


Figura 3.12 Gráfica de Potencia de Transmision de UE en cada iteracion. Fuente: Por Autor.

3.4.13 Algoritmo de Control de Potencia en Lazo Cerrado.

A partir de la SINR obtenida aplicando el algoritmo de control de potencia en lazo abierto, se calcula la potencia de transmisión del UE en lazo cerrado con la expresión 3.10.

$$P_{txUE} = P_{txUE} \text{ lazo Abierto} + f \quad (3.10)$$

Para determinar el valor del factor de compensación dinámica f se utiliza la expresión 3.11 estandarizada por el 3GPP para el canal físico compartido del enlace ascendente (PUSCH) en la sub-trama i .

$$f(i) = f(i - 1) + \delta_{PUSCH}(i - K_{PUSCH}) \quad (3.11)$$

Teniendo en cuenta que el simulador trabaja en modo FDD y la recomendación de la ETSI TS 36.213, el valor de $K_{PUSCH} = 4$ y los valores de δ_{PUSCH} en modo acumulativo son pasos de [-1, 0, 1, 3] dB y en modo absoluto son pasos de [-4, -1, 1, 4]; estos pasos son escogidos a partir del modo de comandos TPC seleccionado por el usuario en la interfaz del simulador y la diferencia entre la SINR recibida en el eNB y la SINR objetivo.

3.4.14 Interfaz Gráfica

Para la selección de parámetros del control de potencia por parte de usuario, en la interfaz gráfica del bloque de capacidad se ha agregado el módulo de control de potencia para ser utilizado con la técnica de reuso de frecuencia UFR. En la Figura 3.13 se muestra la nueva interfaz gráfica de la versión 4 del simulador.

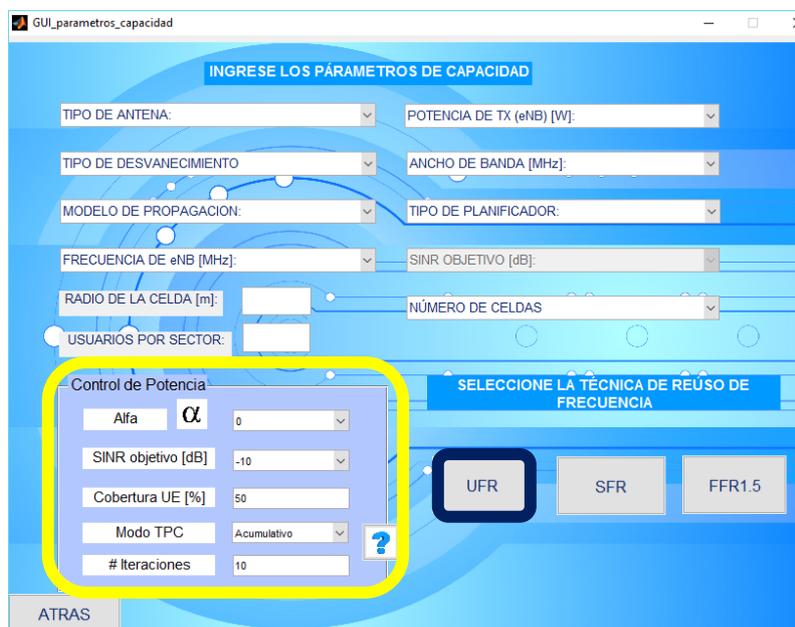


Figura 3.13 Interfaz gráfica de la versión 4 del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE.



3.7 PRUEBAS

Para comprobar las funcionalidades y el funcionamiento de la versión 4 del simulador con la implementación de los algoritmos de control de potencia, cada módulo, función o script agregado al Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE, se ejecuta con parámetros de entrada específicos que permitan evaluar el componente a través de los resultados obtenidos [46].

Cada tipo de prueba se realiza acorde al nivel de prueba (unidad, integración y sistema) y se encuentra consignada en el apéndice A “Pruebas de verificación del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE”.

Posteriormente de la verificación del simulador se realiza la validación de este mediante la creación de distintos escenarios de estudio que permitan evaluar el desempeño de los algoritmos implementados y la función de algunos parámetros esenciales del control de potencia.



CAPÍTULO IV

CASOS DE ESTUDIO

4.1 INTRODUCCIÓN

La versión 4 del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE, integra los algoritmos de control de potencia en el enlace ascendente al bloque de capacidad con UFR.

La validación de los algoritmos de control de potencia se realiza mediante el análisis de la potencia de transmisión de los UEs en cada iteración y el desempeño del sistema en términos de capacidad, cobertura y potencia de transmisión, planteando diferentes escenarios de estudio, donde se varían parámetros como: alfa, distancia, número de usuarios, tipo de planificador de paquetes, que generan resultados de probabilidad de servicio, CDF del *throughput* y potencia de transmisión de los UEs.

En la generación de los resultados para cada escenario de estudio planteado, se realizan 50 iteraciones, para las configuraciones donde no se presenta desvanecimiento (caso ideal) y 100 iteraciones para los escenarios con desvanecimiento.

4.2 ESCENARIO 1

El objetivo es evaluar el comportamiento de los algoritmos de control de potencia en lazo abierto y lazo cerrado, variando el radio de la celda y el número de UE en la celda con desvanecimiento rápido, desvanecimiento lento y sin desvanecimiento; manteniendo los demás parámetros fijos.

En la Tabla 4.1 se consigna los parámetros estáticos utilizados para el escenario de simulación.

Parámetro	Valor
Tipo de Antena	<i>Katherein 742215</i>
Modelo de Propagación	<i>Free Space</i>
Frecuencia	1710 MHz
Potencia Tx eNB	40 W
Ancho de Banda	20 MHz
Planificador de Paquetes	Round Robin



SINR Objetivo	0 dB
Número de Celdas	4
Alfa	0.6

Tabla 4.1 Parámetros fijos de Simulación Escenario 1. Fuente: Por Autor.

4.2.1 Análisis de la Potencia de Transmisión y SINR Instantánea

En la Figura 4.1 se muestra la potencia de transmisión y la SINR en cada iteración para tres (3) UEs de una celda específica, usando los algoritmos de control de potencia con desvanecimiento rápido y radio de celda de 500 metros. Los UEs seleccionados se encuentran a una distancia cerca (UE 38), lejos (UE 19) e intermedia (UE 24) al eNB de servicio.

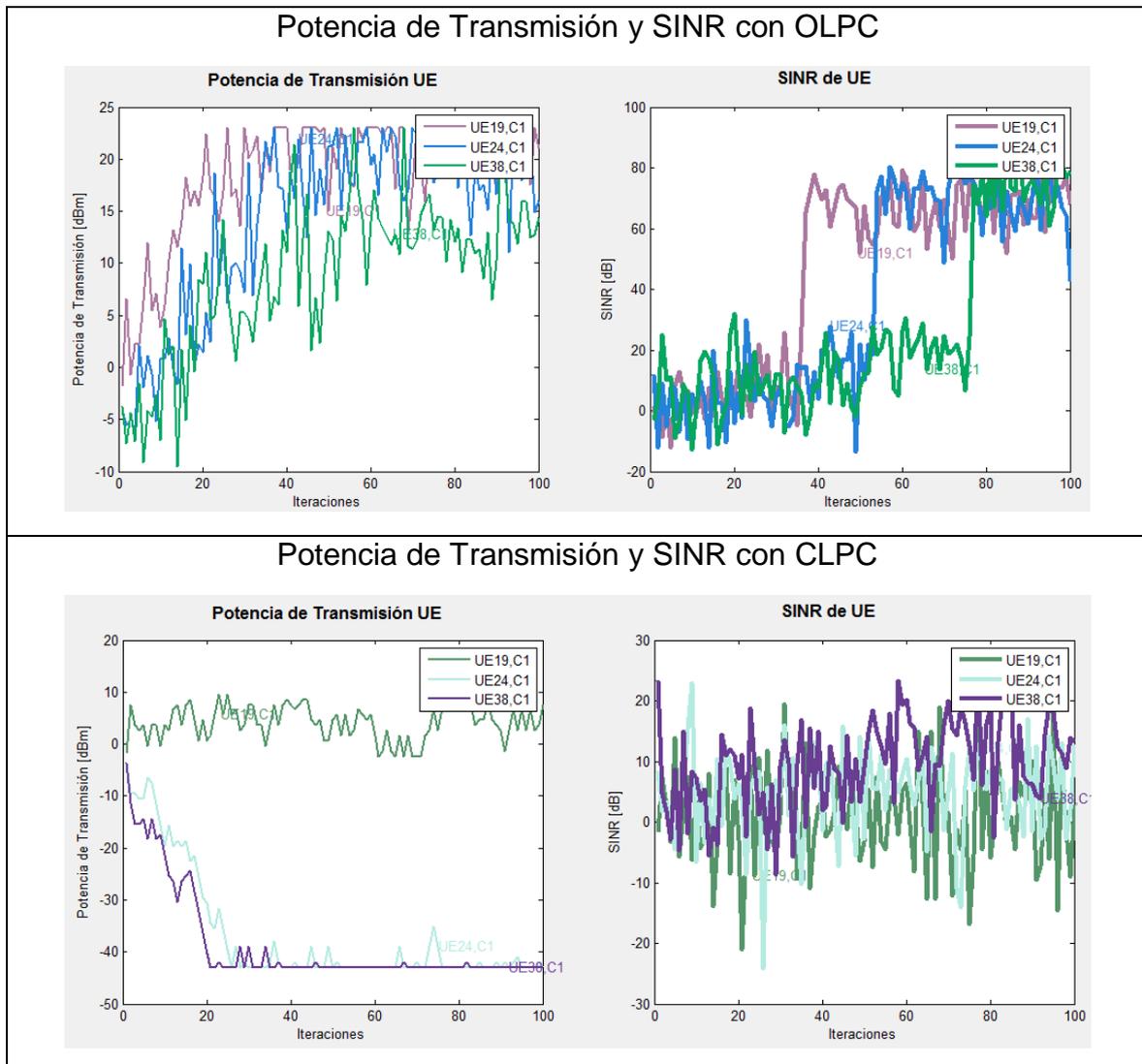


Figura 4.1 Potencias de transmisión y SINR de UE en cada iteración a una distancia cerca, lejos e intermedia al eNB de servicio. Fuente: Por Autor.



En la Figura 4.1, en OLPC, el UE 19 que se encuentra lejos del eNB, sube la potencia de transmisión hasta al alcanzar la máxima de 23dBm, siendo este quien utiliza toda su potencia en la mayoría de iteraciones; el UE 24 y UE 38 mantienen un nivel de potencia de transmisión estable a partir de la iteración 60 aproximadamente, donde la potencia promedio del UE 24 es de 20dBm, esta potencia es mucho mayor a la utilizada por el UE 38 que en promedio es de 15dBm, variando entre 23dBm y 5dBm. En esta configuración a medida que el UE está más lejos del eNB, requiere una potencia de transmisión mayor para conectarse a la red; además, al presentarse un canal con desvanecimiento rápido, cuando un UE llega a un nivel de potencia de transmisión estable, esta puede variar alrededor de 18dBm.

Al aplicar CLPC, el UE 19 transmite inicialmente con una potencia de 0dBm y cambia su nivel estable de potencia entre 10dBm y 5dBm manteniendo servicio, los UEs 24 y 38 cuentan con servicio, con una potencia entre 0dBm y -20dBm hasta la iteración 12, después esta empieza a disminuir aproximándose a la potencia de transmisión mínima de -43dBm.

En las configuraciones realizadas, los UE encuentran un nivel estable de potencia de transmisión; en el caso de OLPC los UE inicialmente empiezan a aumentar su potencia hasta alcanzar la conexión con la red, una vez cumplido el objetivo se estabiliza su potencia de transmisión.

Para CLPC los UE al realizar la conexión con el eNB, reciben los comandos TPC a fin de controlar la potencia de transmisión, manteniendo los niveles de señal acorde a la SINR objetivo del sistema; por ello, los UE una vez conectados a la red, suben o bajan su potencia de transmisión, en busca de que todas las potencias recibidas en el eNB sean iguales y cumplan con la SINR objetivo.

Comparando los algoritmos, el control de potencia en lazo cerrado permite la conexión de los UE con el eNB de servicio, utilizando una potencia de transmisión mucho menor a la de lazo abierto, generando un menor consumo de energía de los dispositivos móviles y mayor tiempo de conexión con la red de comunicaciones LTE. Al analizar el efecto cerca lejos en un sistema LTE, en el caso de lazo abierto, los UE utilizan potencias de transmisión cercanas a la potencia máxima disponible, lo que genera que los UE al borde de la celda necesiten transmitir a su potencia máxima, aumentando el nivel de ruido y por lo tanto, la calidad de la señal recibida en el eNB de otros UEs empeora, lo que puede ocasionar interrupción en la comunicación; con el algoritmo de control de potencia en lazo cerrado los UEs no necesitan aumentar su potencia al máximo para alcanzar la SINR deseada, permitiendo que la mayoría de los UEs transmitan con potencias menores a 0dBm acorde a la SINR recibida en el eNB de servicio, llegando al receptor señales con intensidades similares, es decir, las SINR recibidas en el eNB de los UEs son aproximadamente la mismas, logrando un mejor desempeño en la red que con lazo abierto.



4.2.2 Análisis de la Potencia de Transmisión

La CDF de la potencia de transmisión con lazo abierto y lazo cerrado en una celda del sistema LTE, para diferentes radios con desvanecimiento rápido y 48 UE por celda, se muestra en la Figura 4.2.

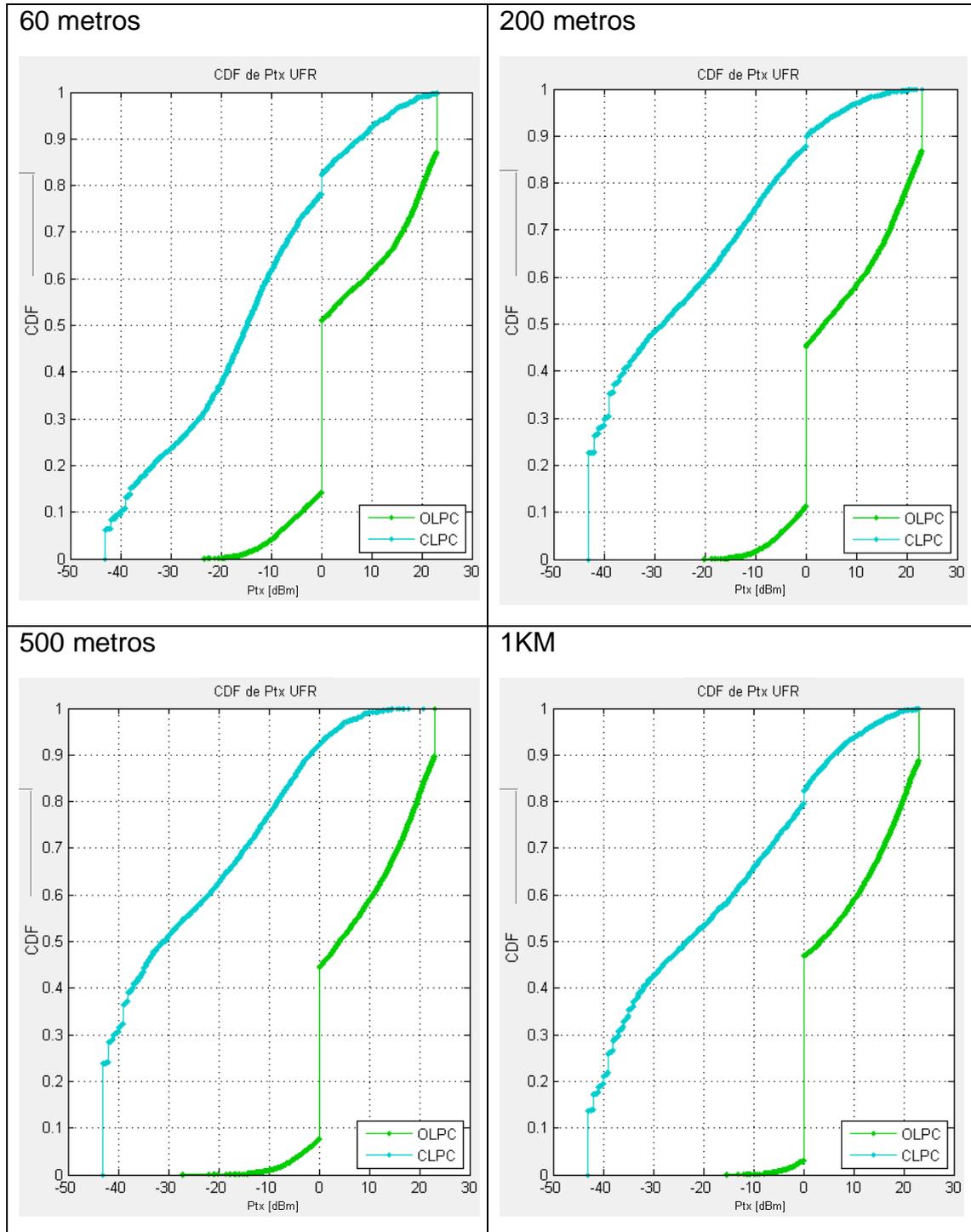


Figura 4.2 CDF Potencia de Transmisión con OLPC y CLPC variando radio de celda. Fuente: Por Autor.



En la Figura 4.2 para CLPC, la probabilidad de una potencia de transmisión menor o igual a -10dBm es del 60% con radio de celda de 60 metros, de 75% con radio de 200 metros, de 78% en 500 metros y 68% en 1KM.

En el caso de OLPC la probabilidad de una potencia de transmisión menor o igual a 0dBm es del 13% en 60 metros, 11% en 200 metros, 8% en 500 metros y 2% en 1KM.

La potencia de transmisión de los UE con CLPC, representada por la CDF para diferentes radios de celda, siempre se encuentra por encima de la CDF de OLPC; en CLPC más del 70% de los UE transmiten con potencias menores a 0dBm, pero OLPC el porcentaje de UE que transmiten con potencias entre -30dBm y 0dBm se encuentra entre el 15% y 1% , debido a que en lazo abierto para superar la SINR requerida siempre se debe aumentar la potencia de transmisión del UE, en cambio con lazo cerrado el eNB se encarga de controlar la intensidad de las señales recibidas de los UEs, disminuyendo la interferencia y permitiendo la conexión de los UEs con potencias de transmisión mucho menores.

En el simulador se establece el valor 0dBm para los UEs que no tienen conexión y por lo tanto no transmiten, presentándose en la Figura 4.2 discontinuidades de salto finito mayores en las CDF de lazo abierto en comparación con las de lazo cerrado; mostrando que el algoritmo de control de potencia en lazo abierto deja mayor cantidad de UE sin servicio que lazo cerrado.

Teniendo en cuenta los radios de celda para 48 UE por celda, la probabilidad de potencias menores a 0dBm es mayor al aplicar CLPC con radios de celda de 200 metros y 500 metros, y en OLPC con radios de 60 metros y 200 metros.

4.2.3 Análisis de Probabilidad de Servicio

En la Tabla 4.2 se muestran los resultados de probabilidad de servicio sin desvanecimiento, en la Tabla 4.3 con desvanecimiento lento y en la Tabla 4.4 con desvanecimiento rápido.

Radio \ UE	24		48		75		99	
	OL	CL	OL	CL	OL	CL	OL	CL
60 metros	99.42	99.52	98.63	99.54	97.61	98.53	98.62	98.82
200 metros	99.42	99.69	99.56	99.68	99.53	99.66	99.73	99.74
500 metros	99.71	99.77	99.65	99.72	99.57	99.68	99.42	99.47
1 KM	99.65	99.75	99.73	99.82	99.73	99.81	99.68	99.74

Tabla 4.2 Probabilidad de Servicio sin desvanecimiento. Fuente: Por Autor.

Radio \ UE	24		48		75		99	
	OL	CL	OL	CL	OL	CL	OL	CL
60 metros	60.94	75.66	54.86	68.45	56.75	70.20	58.14	71.54
200 metros	67.39	75.83	71.10	80.37	70.09	79.19	69.11	78.56
500 metros	68.05	70.89	66.71	73.92	66.52	75.55	70.02	77.08
1 KM	55.96	62.36	66.86	66.27	69.00	71.29	67.65	69.87

Tabla 4.3 Probabilidad de Servicio con desvanecimiento lento. Fuente: Por Autor.



Radio \ UE	24		48		75		99	
	OL	CL	OL	CL	OL	CL	OL	CL
60 metros	35.31	53.91	36.32	54.75	36.56	53.30	37.44	54.19
200 metros	40.75	61.49	45.04	65.15	44.58	63.16	42.84	62.35
500 metros	42.45	63.19	40.26	60.33	43.81	63.37	42.60	62.61
1 KM	41.45	59.84	39.96	58.49	42.38	59.72	44.47	62.47

Tabla 4.4 Probabilidad de Servicio con desvanecimiento rápido. Fuente: Por Autor.

En la Tabla 4.2 en un canal sin desvanecimiento, la probabilidad de servicio de lazo abierto y lazo cerrado es muy similar para un radio de celda y número de UE por celda específico, con una diferencia entre 0.2% entre los algoritmos de control de potencia. En este caso la estimación de la potencia de transmisión realizada por el control de potencia en lazo abierto es precisa, ya que no se presentan variaciones en el canal de propagación.

Para un canal con desvanecimiento lento, según la Tabla 4.3 se tiene una diferencia entre la probabilidad de servicio con lazo abierto y lazo cerrado hasta del 15%, generando una probabilidad de servicio mayor, el control de potencia en lazo cerrado; esta diferencia es significativa en comparación con la configuración realizada sin desvanecimiento. En este caso la mayor probabilidad de servicio para los distintos UE por celda se presenta en lazo cerrado con un radio de celda de 200 metros. Comparando los algoritmos de control de potencia, la variación de canal de propagación causa una estimación imprecisa de la potencia de transmisión del UE, donde en un canal con desvanecimiento lento la probabilidad de servicio está entre 54.86% y 80.37%, generando el algoritmo de control de potencia en lazo cerrado probabilidades de servicio mayores en comparación con el lazo abierto.

Para la configuración con desvanecimiento rápido según la Tabla 4.4, para 24 UE y 48 UE por celda, las probabilidades de servicio mayores se encuentran con radios de celda de 200 metros y 500 metros; para 75 UE y 99 UE por celda, las probabilidades de servicio más altas se dan con un radio de celda de 500 metros. Comparando los algoritmos de control de potencia se alcanza una mayor probabilidad de servicio con el algoritmo de control de potencia en lazo cerrado, con una diferencia respecto al lazo abierto de aproximadamente del 20%; esta diferencia es mayor a la obtenida con las configuraciones de desvanecimiento lento y sin desvanecimiento, debido a que en las configuraciones realizadas sin desvanecimiento y con desvanecimiento lento, el OLPC en la estimación de la potencia de transmisión tiene en cuenta las pérdidas de propagación y desvanecimientos lentos pero no los desvanecimientos rápidos, siendo necesario un control de potencia idealmente instantáneo, que tenga la capacidad de compensar los desvanecimientos rápidos del canal como lo es el CLPC.

En cuanto a la relación entre los radios de celda manteniendo el número de UE fijo, en un sistema con desvanecimiento, los radios de celda de 200 metros y 500 metros obtienen las probabilidades de servicio más altas.

4.3 ESCENARIO 2

Se evalúa el comportamiento de los algoritmos de control de potencia variando el factor de compensación con los demás parámetros fijos.

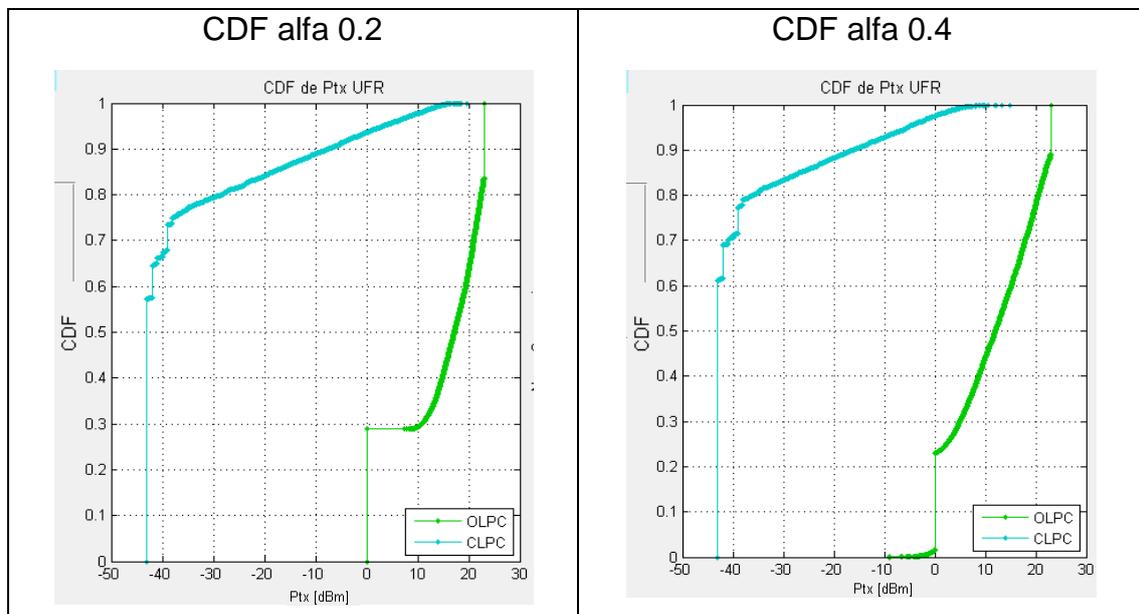
En la Tabla 4.5 se muestran los parámetros estáticos utilizados para el escenario de simulación.

Parámetro	Valor
Tipo de Antena	<i>Katherein 742215</i>
Desvanecimiento	Rápido
Modelo de Propagación	<i>Free Space</i>
Frecuencia	1710 MHz
Radio de Celda	500 metros
UE por Sector	25
Potencia Tx	40 W
Ancho de Banda	20 MHz
Planificador de Paquetes	Round Robin
SINR Objetivo	-5 dB
Número de Celdas	4

Tabla 4.5 Parámetros fijos de Simulación Escenario 2. Fuente: Por Autor.

4.3.1 Análisis de la Potencia de Transmisión

La CDF de la potencia de transmisión en lazo abierto y lazo cerrado para una celda del sistema LTE, con diferentes valores de alfa se muestra en la Figura 4.3.



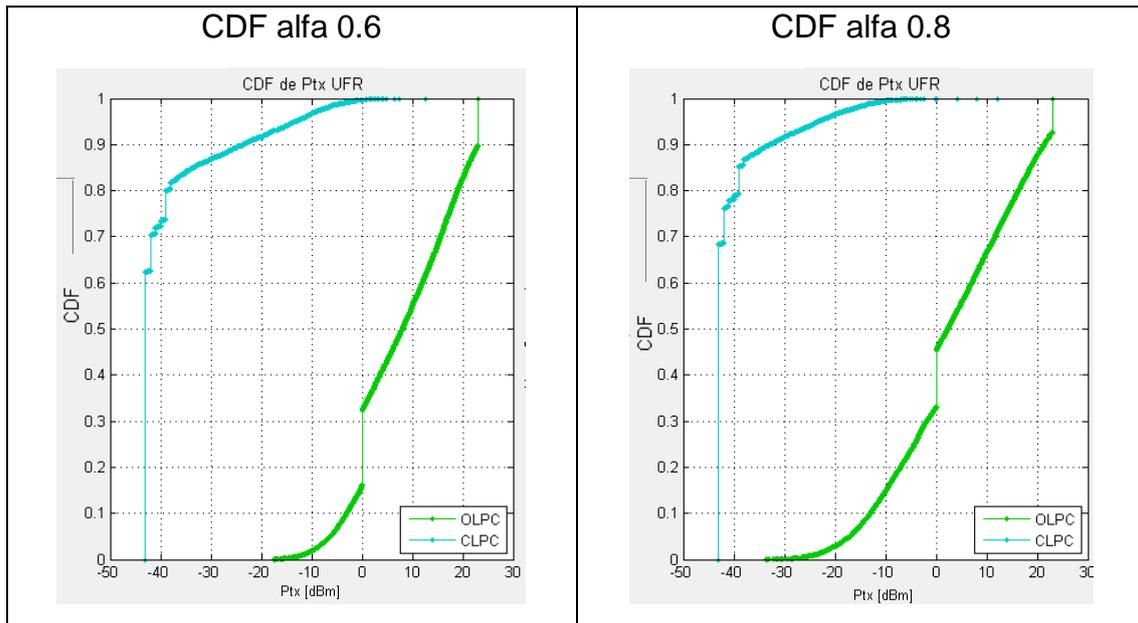


Figura 4.3 CDF Potencia de Transmisión OLPC y CLPC variando el factor de compensación. Fuente: Por autor.

En la Figura 4.3 para OLPC a medida que alfa aumenta, se tienen potencias de transmisión más pequeñas, en alfa 0.2, las potencias de transmisión se encuentran entre 0dBm y 23dBm, en alfa 0.4 entre -10dBm y 23dBm, en alfa 0.6 entre -18dBm y 23dBm y en alfa 0.8 entre -30dBm y 23dBm. En CLPC con alfa 0.2 las potencias transmitidas por los UE se encuentran entre 20dBm y -43dBm, en alfa 0.4 entre 15dBm y -43dBm, en alfa 0.6 y 0.8 entre 12dBm y -43dBm.

La potencia transmitida por los UE utilizando lazo cerrado es mucho menor respecto de lazo abierto, donde en lazo cerrado para alfa 0.2 y 0.4, la potencia de transmisión es menor a -10dBm para el 90% y el 92% de los UEs respectivamente; en alfa 0.6 y 0.8 la potencia de transmisión es menor a -20dBm para el 92% y 98% de los UEs.

En este escenario al aumentar el valor de alfa, la probabilidad de alcanzar una potencia de transmisión menor o igual a un valor aumenta en los dos algoritmos de control de potencia, ya que se compensa una porción mayor de las pérdidas de propagación y se limita la potencia de transmisión del UE en menor proporción.

4.3.2 Análisis de Probabilidad de Servicio

En la Tabla 4.6 se muestran los valores de probabilidad de servicio para diferentes valores de alfa, con los algoritmos de control de potencia en lazo abierto y lazo cerrado.



Valor de Alfa	Probabilidad de Servicio [%]	
	OLPC	CLPC
α		
0.2	57.17	81.44
0.4	65.93	81.88
0.6	68.24	81.53
0.8	68.71	81.50

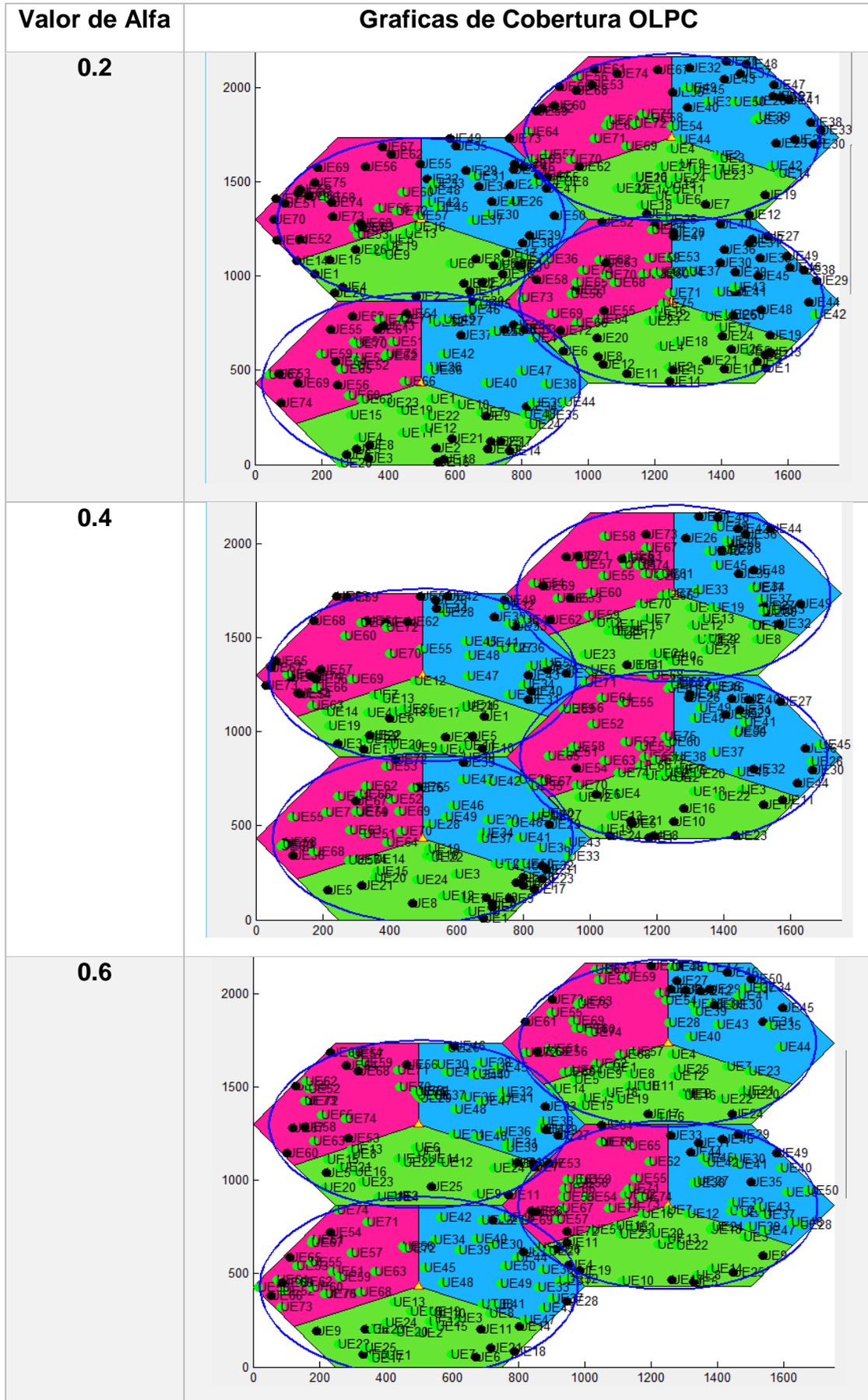
Tabla 4.6 Probabilidad de Servicio variando el factor de compensación.

En la Tabla 4.6 en OLPC al aumentar el valor del factor de compensación aumenta el número de UE que acceden al sistema LTE, pasando de una probabilidad de servicio de 57.17% con alfa 0.2 a una de 68.71% con alfa 0.8; en CLPC la probabilidad de servicio varía entre 81.44% y 81.88% para los distintos valores de alfa.

En este escenario, el algoritmo de control de potencia en lazo cerrado alcanza una mayor probabilidad de servicio respecto al control de potencia en lazo abierto. También ante cualquier valor de alfa, la probabilidad de servicio alcanzada con el algoritmo de control de potencia en lazo cerrado no varía significativamente como es el caso del control de potencia en lazo abierto, donde el factor de compensación es un parámetro crucial para la estimación de la potencia de transmisión de los dispositivos móviles; ya que el algoritmo de control de potencia en lazo cerrado, aunque se basa en el lazo abierto, la estimación de la potencia transmitida del UE se realiza utilizando los comandos TPC, obteniendo una probabilidad de servicio promedio de 81.58% para los diferentes valores de alfa, la cual es mayor en 12.87% al valor más alto de probabilidad de servicio alcanzado con OLPC en alfa 0.8.

4.3.3 Análisis de la Cobertura

En la Figura 4.4 se muestra la cobertura en el sistema LTE, al variar el factor de compensación empleando el algoritmo de control de potencia en lazo abierto, los UE con servicio están representados con puntos verdes dentro del radio de cobertura de color azul para cada celda y los UE sin servicio con puntos negros; para que un UE tenga servicio debe tener servicio en más de la mitad de las iteraciones realizadas.



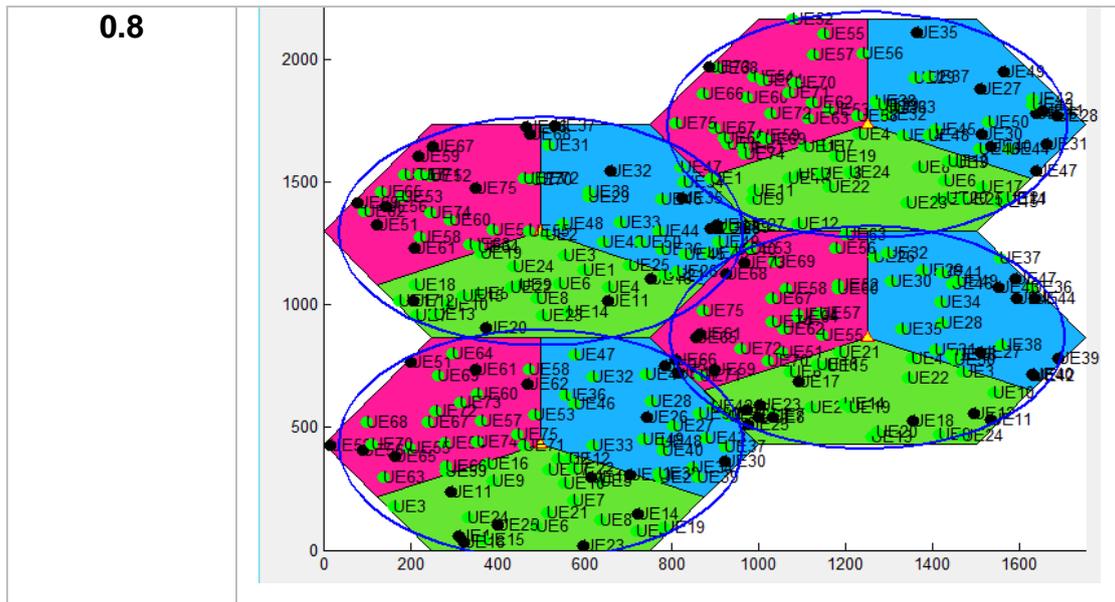


Figura 4.4 Gráficas de Cobertura con OLPC variando el factor de compensación. Fuente: Por Autor.

En la Figura 4.4 con un valor de alfa de 0.2 y 0.4, los UEs que tienen servicio en el sistema son los que se encuentran cerca al eNB de servicio y los UEs sin servicio son los más alejados. Con alfa 0.6, los UEs que cuentan con servicio son los cercanos al eNB de servicio y algunos en el borde de la celda, generando una cobertura mayor en comparación con alfa 0.2 y 0.4. En alfa 0.8, por cubrir a los usuarios del borde de la celda algunos de los UEs cercanos al eNB no tienen servicio.

Teniendo en cuenta los resultados de probabilidad de servicio de la Tabla 4.6 y las graficas de cobertura para el control de potencia en lazo abierto, los valores de alfa que brindan mayor cobertura y servicio a los UEs son 0.4, 0.6 y 0.8, estos son seleccionados por el operador de la red a fin de dar prioridad a los equipos de usuario cercanos al eNB con alfa 0.4 o a los del borde de la celda con alfa 0.6 y 0.8, es decir, elegir entre aumentar la cobertura o el *throughput* en la red LTE.

4.3.4 Análisis de *Throughput*

La CDF del *throughput* con lazo abierto y lazo cerrado en una celda del sistema LTE, para diferentes valores de alfa se muestra en la Figura 4.5.

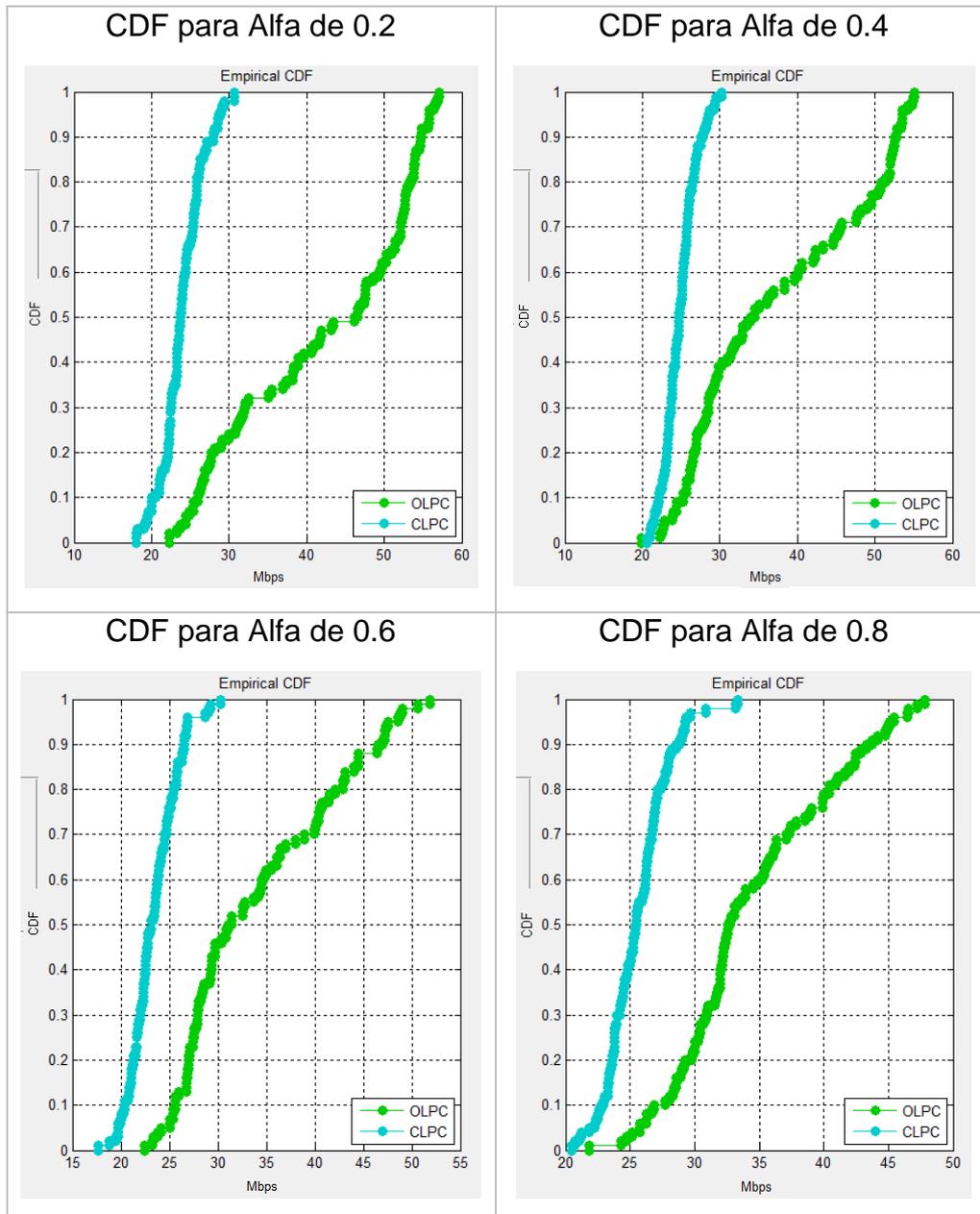


Figura 4.5 CDF *Throughput* con OLPC y CLPC variando el factor de compensación. Fuente: Por Autor.

En la Figura 4.5, la CDF de CLPC siempre se encuentra por encima de la CDF OLPC; en alfa 0.2 la probabilidad de un *throughput* mayor o igual a 25Mbps es del 90% con OLPC y del 30% con CLPC, con alfa 0.4 la probabilidad del mismo *throughput* es del 90% con OLPC y del 40% con CLPC, en alfa 0.6 la probabilidad es del 95% con OLPC y del 30% con CLPC y para alfa 0.8 es del 98% con OLPC y del 55% con CLPC.

En todas las configuraciones, la probabilidad de alcanzar un *throughput* mayor o igual a un valor determinado siempre es mayor con el control de potencia en lazo abierto. En el caso del OLPC a medida que alfa aumenta, la compensación de las pérdidas de propagación es mayor y aumenta el número de UE conectados a la red, disminuyendo las probabilidades de alcanzar un *throughput* alto; en



CLPC no se evidencian cambios significativos en las CDF para los diferentes valores de alfa, porque las variaciones de este parámetro son compensadas con los comandos TPC enviados por el eNB.

En este escenario a partir de la Figura 4.5 y la Tabla 4.6, se evidencia claramente la relación entre la probabilidad de servicio y capacidad del sistema de comunicaciones móviles, en el que al aumentar la probabilidad de servicio acceden más usuarios al sistema, el ancho de banda (número de RB) disponible para la transmisión de información de cada UE en la celda disminuye y por lo tanto la velocidad de transmisión de datos también, ocasionando un menor *throughput* en la celda.

De los resultados obtenidos se tiene que el algoritmo CLPC no tiene como objetivo aumentar el *throughput* del sistema, sino aumentar en número de UE conectados a la red LTE. También, los valores de alfa que permiten obtener un equilibrio entre la probabilidad de servicio, cobertura y *throughput* en el sistema LTE son 0.4, 0.6 y 0.8, donde el algoritmo de control de potencia en lazo cerrado presenta mejor desempeño ante las variaciones de alfa con respecto al control de potencia en lazo abierto, no maximizando el *throughput* pero si mejorando la cobertura y la probabilidad de servicio en la red móvil LTE.

4.4 ESCENARIO 3

En sistemas de comunicaciones móviles, el UE estima su potencia de transmisión para alcanzar la SINR objetivo exigida en la red LTE, teniendo en cuenta la potencia disponible. Este escenario evalúa el desempeño de los algoritmos de control de potencia variando la SINR objetivo en el enlace ascendente del sistema LTE.

En la Tabla 4.7 se muestran los parámetros fijos de simulación.

Parámetro	Valor
Tipo de Antena	<i>Katherein 742215</i>
Desvanecimiento	Rápido
Modelo de Propagación	<i>Free Space</i>
Frecuencia	1710 MHz
Radio de Celda	500 metros
UE por sector	25
Alfa	0.6
Potencia Tx	40 W
Ancho de Banda	20 MHz
Planificador de Paquetes	Round Robin
Número de Celdas	4

Tabla 4.7 Parámetros fijos de Simulación del escenario 3. Fuente: Por Autor.

4.4.1 Análisis de la Potencia de Transmisión

La CDF de la potencia de transmisión con lazo abierto y lazo cerrado en una celda del sistema LTE, para diferentes valores de SINR objetivo se muestra en la Figura 4.6.

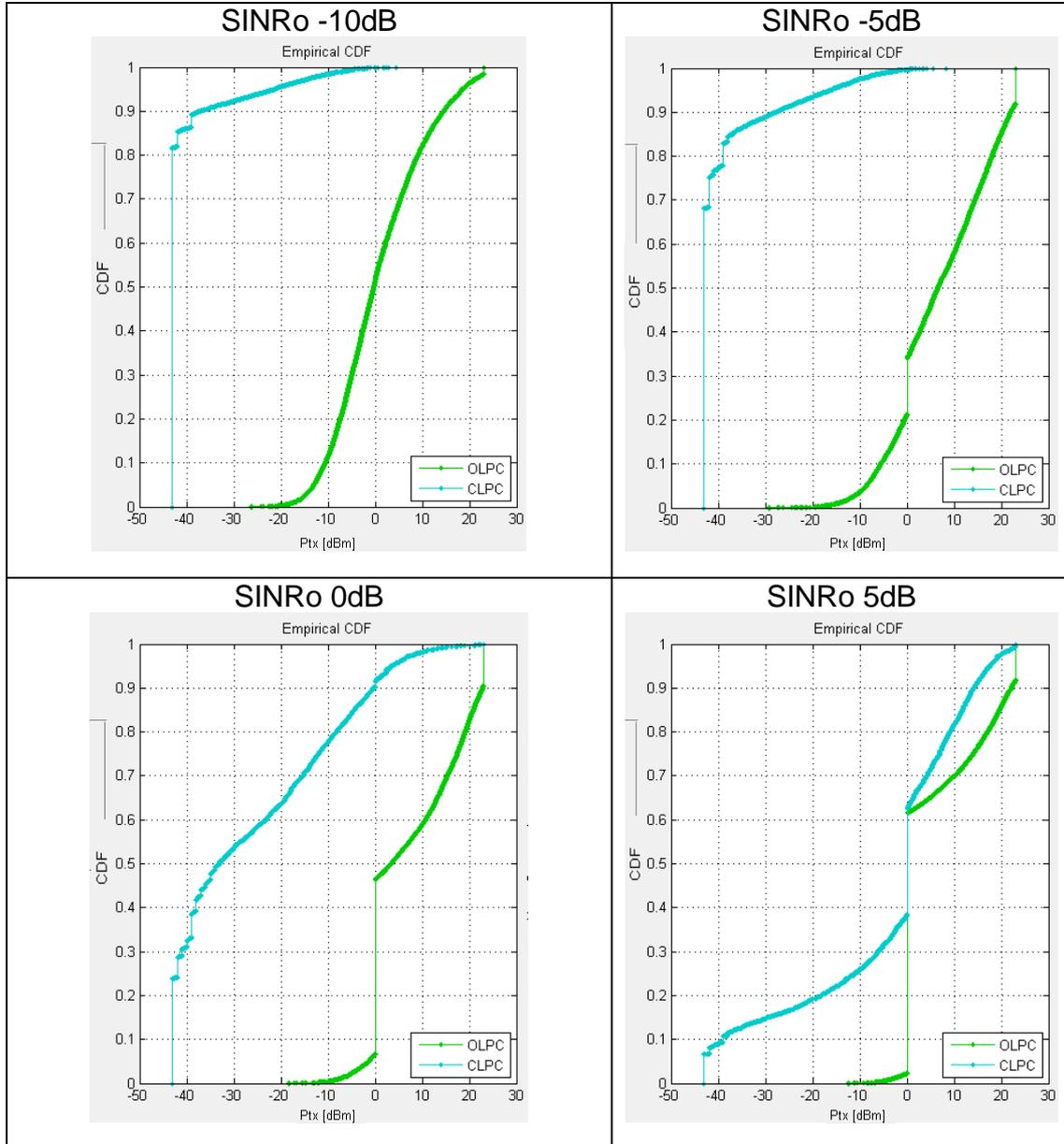


Figura 4.6 CDF de Potencia de Transmisión con OLPC y CLPC variando la SINR objetivo. Fuente: Por Autor.

En la Figura 4.6 en OLPC, la probabilidad de una potencia de transmisión menor o igual a 10dBm es del 80% con una SINR de -10dB, del 58% con una SINR de -5dB, del 60% con una SINR de 0dB y del 70% con una SINR de 5dB.

Al aplicar CLPC, la probabilidad de potencias menores o iguales a 10dBm para una SINR objetivo de -10dB y -5dB es del 100%, para una SINR de 0dB es del 98% y con una SINR de 5dB es del 83%.



Para los diferentes valores de SINR, la probabilidad de alcanzar una potencia de transmisión menor o igual a un valor siempre es mayor utilizando lazo cerrado respecto a lazo abierto. En OLPC para una SINR objetivo de -5dB, 0dB y 5dB se evidencia una discontinuidad en las CDF en el valor de 0dBm (en el simulador los UE con potencia de transmisión de 0dBm representan a los UE que no transmiten), que al aumentar el valor de SINR objetivo, aumenta el tamaño del salto y por lo tanto el porcentaje de UE que no alcanzan la SINR requerida, quedando sin servicio. En CLPC para una SINR objetivo de -10dB y -5dB, las curvas de CDF son muy similares, los UE transmiten con potencias entre -43dBm y 10dBm, pero con una SINR objetivo de 0dB y 5dB los UE transmiten con potencias entre -43dBm y 23dBm para cumplir con la SINR requerida en el sistema.

4.4.2 Análisis de la Probabilidad de Servicio

En la Tabla 4.8 se muestra cómo cambia la probabilidad de servicio del sistema LTE según la SINR exigida.

SINR objetivo [dB]	Probabilidad de Servicio [%]	
	OLPC	CLPC
-10	89.20	92.13
-5	70.32	82.19
0	43.46	62.93
5	29.28	39.96
10	27.31	36.63

Tabla 4.8 Probabilidad de Servicio variando la SINR objetivo. Fuente: Por Autor.

En los resultados de probabilidad de servicio de la Tabla 4.8 a medida que se exige mejor calidad de la señal, disminuye la probabilidad de servicio; es decir, aumenta la cantidad de UE sin servicio.

En OLPC la diferencia entre la probabilidad de servicio con SINR objetivo de -10dB y 10dB es del 61.89% y en CLPC para los mismos valores de SINR es de 55.5%.

Según los resultados obtenidos, en el caso de una SINR objetivo de -10dB, la probabilidad de servicio entre los algoritmos de control de potencia se diferencia en un 2.93%, para una SINR de -5dB y 0dB esta diferencia es de 11.87% y 19.47% respectivamente. En el caso de una SINR objetivo de 5dB la diferencia de la probabilidad de servicio alcanzada entre los algoritmos es de 10.68% y para 10dB del 9.32%.

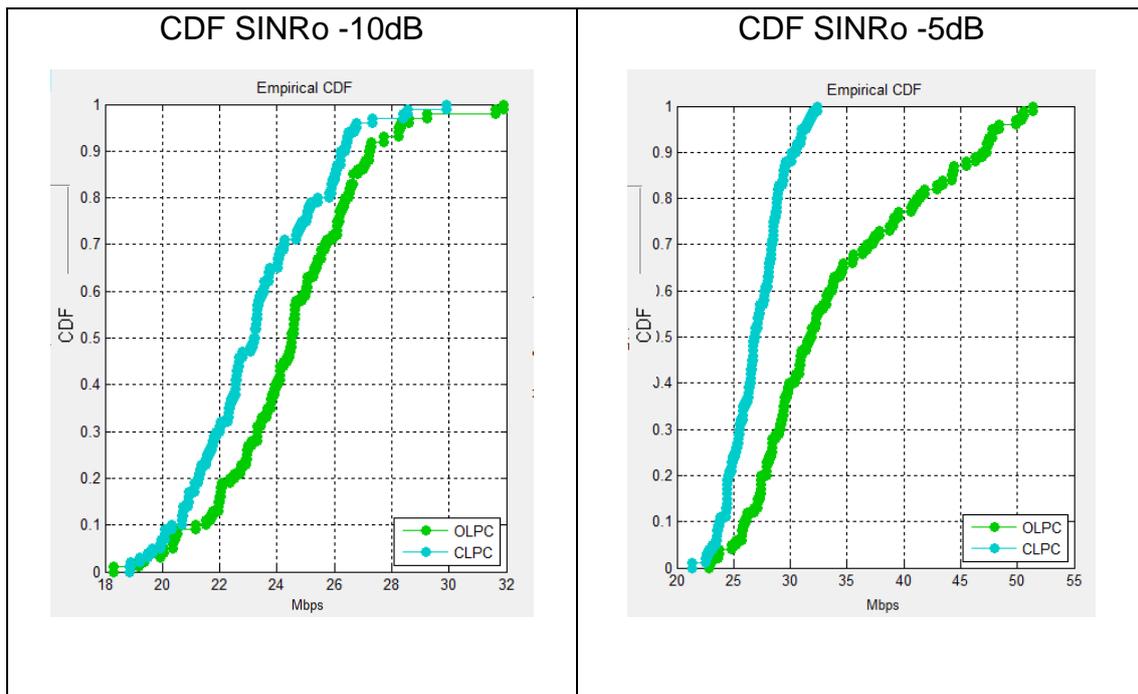


En este escenario, el control de potencia en lazo cerrado alcanza una probabilidad de servicio mayor con respecto al lazo abierto, presentándose una diferencia promedio de los valores de probabilidad de servicio entre los algoritmos de lazo abierto y lazo cerrado del 10.85%. También se resalta que los algoritmos de control de potencia no pueden mantener una probabilidad de servicio estable al variar la SINR objetivo, siendo este un parámetro esencial en la configuración de la red de telefonía móvil LTE.

Al comparar los resultados de probabilidad de servicio para los valores de SINR objetivo empleando los algoritmos de control de potencia, se tiene que las probabilidades de servicio mayores al 65% se presentan con una SINR de -10dB y -5dB en los dos algoritmos de control de potencia, pero a medida que se requiere mayor calidad de la señal, esta probabilidad puede disminuir, obteniéndose probabilidades de servicio menores del 40% para valores de SINR de 5dB y 10dB.

4.4.3 Análisis del *Throughput*

La CDF del *throughput* con lazo abierto y lazo cerrado en una celda del sistema LTE, para diferentes valores de SINR objetivo se muestra en la Figura 4.7.



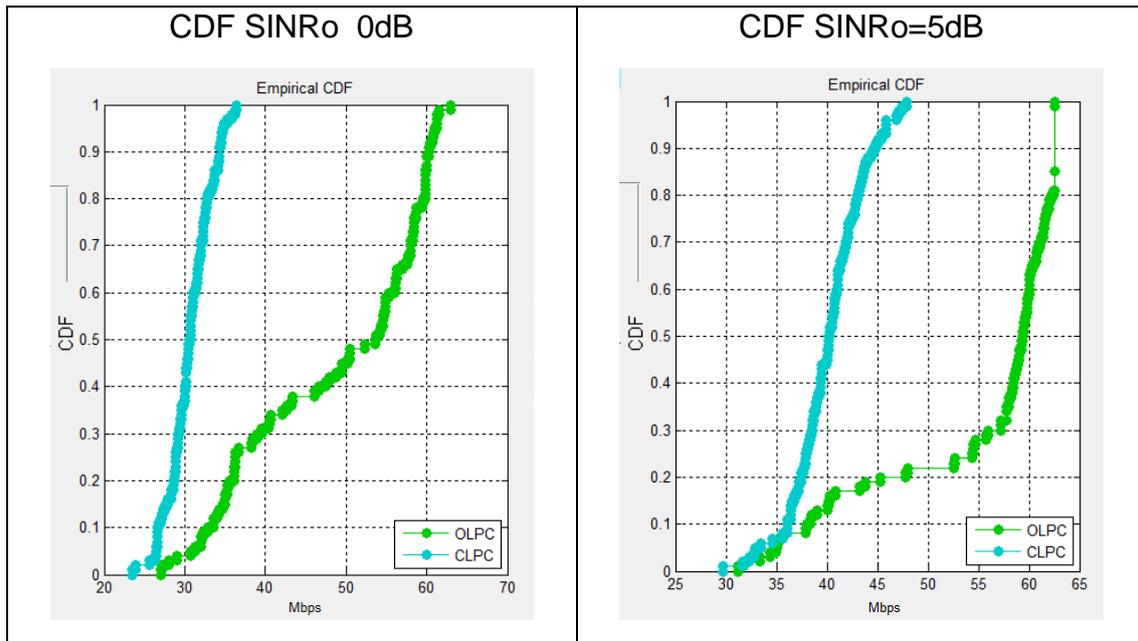


Figura 4.7 CDF *Throughput* con OLPC y CLPC variando la SINR objetivo.
 Fuente: Por Autor.

En la Figura 4.7 para una SINR objetivo de -10dB, las curvas de CDF de los algoritmos de control de potencia son muy similares, con SINR de -5dB para alcanzar un *throughput* mayor o igual a 30Mbps, la probabilidad es del 60% con OLPC y del 12% con CLPC, con SINR de 0dB la probabilidad de un *throughput* mayor o igual a 40Mbps, es del 70% con OLPC y del 0% con CLPC y para SINR objetivo de 5dB la probabilidad de un *throughput* mayor o igual a 60Mbps es del 40% con OLPC y del 0% con CLPC.

Al analizar las CDF de los algoritmos de control de potencia variando la SINR objetivo, en todos los casos la CDF de CLPC está por encima de OLPC, donde la probabilidad de un *throughput* mayor o igual a un valor determinado siempre es mayor con el control de potencia en lazo abierto respecto a lazo cerrado; en el caso de SINR objetivo de -10dB, las CDF del *throughput* son muy similares, pero a medida que la SINR objetivo aumenta la probabilidad de un *throughput* mayor o igual a un valor determinado aumenta para los dos algoritmos,

En el caso de SINR objetivo de -10dB, los dos algoritmos tienen *throughput* entre 18Mbps y 32Mbps, pero en 5dB para OLPC está entre 30 Mbps y 65Mbps y en CLPC entre 30Mbps y 48Mbps; En conclusión el control de potencia en lazo cerrado no busca aumentar el *throughput* en el sistema sino la cobertura, enfrentando el aumento de la SINR no solo con el aumento de la potencia de transmisión de los UE, como lo hace el control de potencia en lazo abierto, sino también controlando la interferencia presente en la red LTE.

Teniendo en cuenta la Tabla 4.8 y la Figura 4.7 a medida que la probabilidad de servicio disminuye, son menos los UE conectados con la red, en consecuencia, los UE conectados disponen de una cantidad mayor de bloques de recursos para la transmisión de la información, aumentando la velocidad de transmisión de datos y, por lo tanto, el *throughput* del sistema.



CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado realizó el diseño e implementación de los algoritmos de control de potencia estandarizados para la red de comunicación móvil LTE, teniendo en cuenta la clasificación de control de potencia en lazo abierto y lazo cerrado para el Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE desarrollado por la Universidad del Cauca, permitiendo ver resultados en el enlace ascendente sobre el desempeño del sistema en términos de capacidad, cobertura, potencia de transmisión y *throughput*. Este capítulo da a conocer las conclusiones y trabajos futuros a partir de la 4 Versión del simulador desarrollada.

5.2 CONCLUSIONES

En el desarrollo, diseño, implementación e integración de los algoritmos de control de potencia en el Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE se concluye:

- El Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE con algoritmos de control de potencia, representa una herramienta académica para el estudio y la investigación de la tecnología 4G, conservando la usabilidad del sistema y presentando resultados de capacidad, cobertura potencia de transmisión en el enlace ascendente que posibilita el análisis de esta tecnología.
- La herramienta de desarrollo Matlab junto con la metodología de desarrollo RUP, permite realizar el trabajo de manera modular y observar los cálculos realizados de las diferentes matrices empleadas en el desarrollo de los algoritmos de control de potencia, facilitando la detección de errores y la reutilización del código. En el diseño e implementación de los algoritmos, la metodología RUP, permite el desarrollo de manera iterativa e incremental, en que cada cambio realizado para la mejora del simulador, genera un ejecutable que puede ser mejorado, cambiado o reformado en caso de que sea necesario, lo que fue de gran ayuda para la obtención de la versión 4 del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE.



- El modelado de los algoritmos de control de potencia por medio de diagramas de flujo, permite la implementación de un código estructurado y la identificación de las variables involucradas en el proceso, facilitando la integración y desarrollo de los algoritmos dentro del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE.

Teniendo en cuenta los escenarios de estudio planteados en el trabajo de grado, se realizó la evaluación del desempeño del sistema LTE en términos de potencia de transmisión, cobertura, capacidad y *throughput* con los algoritmos de control de potencia en lazo abierto y lazo cerrado, donde se concluye que:

- El control de potencia en lazo abierto es un algoritmo preciso en la estimación de la potencia de transmisión del UE para sistemas que presenten pérdidas en el canal de propagación y desvanecimiento lento, pero en un canal con desvanecimiento rápido, se hace necesario un control de potencia idealmente instantáneo, con capacidad de compensar estos tipos de desvanecimiento, como lo es el algoritmo de control de potencia en lazo cerrado, donde se presenta una mejora significativa de la probabilidad de servicio respecto al lazo abierto.
- Los resultados de probabilidad de servicio en un sistema sin desvanecimiento son similares, empleando los algoritmos de control de potencia implementados, pero al presentarse en el sistema desvanecimiento lento o rápido, el control de potencia en lazo cerrado alcanza mayores probabilidades de servicio para diferentes radios de celda y número de usuarios en comparación con el algoritmo OLPC.
- Al analizar el efecto cerca lejos en un sistema LTE, en el caso de lazo abierto, la potencia de transmisión de los UE se acerca a la potencia máxima, generando altos niveles de ruido que disminuyen la calidad de la señal recibida en el eNB y en algunos casos la interrupción de la conexión; en CLPC la potencia de los UE es mucho menor con respecto a OLPC y por lo tanto los niveles de ruido también disminuyen, presentando una mayor cobertura, mejor aprovechamiento de la potencia de transmisión de los UEs y control del efecto cerca lejos generado por la interferencia inter-celda.
- El factor de compensación (α) es uno de los parámetros más importantes en el control de la potencia en un sistema LTE. Este parámetro afecta la probabilidad de servicio y cobertura del sistema, presentándose con el algoritmo OLPC variaciones significativas al cambiar el valor de alfa, en cambio, con CLPC la probabilidad de servicio se mantiene estable ante cualquier valor de alfa, por el uso de los comandos TPC.
- La SINR objetivo, es un parámetro crucial en la configuración de la red de telefonía móvil LTE que aumenta el *throughput* y disminuye la probabilidad de servicio de los algoritmos de control de potencia en lazo



abierto y lazo cerrado al aumentar el valor de la SINR objetivo, resaltando que el control de potencia en lazo cerrado siempre alcanza una probabilidad de servicio mayor con respecto al control de potencia en lazo abierto.

- El *throughput* en un sistema LTE es mucho mayor al emplear el algoritmo de control de potencia en lazo abierto para los diferentes escenarios de estudio realizados, ya que este algoritmo se basa principalmente en la estimación de las pérdidas de propagación del canal inalámbrico, sin tener realimentación del eNB; esto causa mayor interferencia en la red y por lo tanto menor probabilidad de servicio; al ser menor el número de UE con conexión en la red, los recursos disponibles para la transmisión de información son mayores, aumentando la velocidad de transmisión y el *throughput* en la celda. Por tal razón OLPC es primordial para la conexión con la red, pero también el algoritmo CLPC para mantener un número mayor de UE conectados en la red, mitigando la interferencia mediante el control de la potencia de transmisión de los UEs y aumentando la cobertura del sistema LTE.

5.3 TRABAJOS FUTUROS

El Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE con algoritmos de Control de Potencia, está a disposición para la integración de diferentes procedimientos realizados dentro de la tecnología 4G que permitan obtener un simulador de alto nivel en el ámbito académico y realizar investigaciones de la misma. En busca de este objetivo se proponen los siguientes trabajos futuros:

- Implementar dentro de las funcionalidades del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE algoritmos de control de potencia para las técnicas de reuso de frecuencia SFR y FFR1.5, tecnología de múltiples antenas (MIMO), escenarios de movilidad de equipos de usuario y mapas cartográficos para la obtención de resultados en entornos reales.
- Implementar y analizar modelos de tráfico que permitan pronosticar el impacto de la carga impuesta de las diferentes aplicaciones demandadas por los usuarios en la capacidad y desempeño de la red LTE.
- Implementar la arquitectura general de protocolos de la interfaz radio LTE con canales lógicos, de transporte y físicos, para la ampliación de funcionalidades del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE a nivel físico y de red.



BIBLIOGRAFIA

- [1] UIT, (2010). La Evolución Hacia los Sistemas Móviles 3G. [En línea]. Disponible en: <http://www.itu.int/itu-news/issue/2003/06/third-generation-es.html> [Último acceso: Ago 2016].
- [2] UNAD. Redes y Sistemas Avanzados de Telecomunicacion I. [En línea]. Disponible en: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/208003/MODULO_EN_LINEA/historia_de_las_comunicaciones_moviles.html [Último acceso: Ago 2016].
- [3] E. Martínez. (2001, May). La Evolución de la Telefonía Móvil. [En línea]. Disponible en: <http://www.eveliux.com/mx/La-evolucion-de-la-telefoniamovil.html> [Último acceso: Ago 2016].
- [4] F. Mendioroz, "Fundamentos de Telefonía Móvil Celular", diapositivas de clase, Departamento de Telemática, Universidad del Cauca, Popayán, 2014.
- [5] F. Rayal, "LTE in a Nutshell : System Overview," *Telesystem Innovations*, 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.tsiwireless.com/docs/whitepapers/LTE%20in%20a%20Nutshell%20-%20System%20Overview.pdf> [Último acceso: Ago 2016].
- [6] ETSI, "Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Requirement for Evolved UTRA (E_UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN)," ETSI TR 125.913, 2010.
- [7] M. Rumney, *LTE and the Evolution to 4G Wireless: Design and measurement challenges*, John Wiley & Sons, 2nd ed. 2013, pp. 4-5.
- [8] NetCommWireless, "Long Term Evolution (LTE) Customising Performance Long Term Evolution (LTE)," p. 06, 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.netcommwireless.com/sites/default/files/LTE-Whitepaper.pdf> [Último acceso: Oct 2016].
- [9] C. Cox, *An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G mobile communications*. John Wiley & Sons, 2012.
- [10] ETSI, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio access capabilities (3GPP TS 36.306 version 10.7.0 Release 10)," Oct 2012.
- [11] M. Sauter, *From GSM To LTE-Advanced: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*. John Wiley & Sons, 2014.
- [12] Kasera y N. Narang, *3G Networks Architecture, Protocols and Procedures*. 1st ed. New Delhi:Tata McGraw-Hill India, 2004.



- [13] ETSI, "Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; General UMTS Architecture (3GPP TS 23.101 version 8.0.0 Release 8)," Ene 2009.
- [14] Tutorialspoint, "LTE Network Architecture," [En línea]. Disponible en: https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm [Último acceso: Oct 2016].
- [15] R. Agusti et al, *LTE Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*, Madrid: Fundación Vodafone España, 2010.
- [16] ETSI, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Unicersal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (3GPP TS 36.300 version 9.4.0 Release 9)," Jul 2010.
- [17] A. Networks. LTE eNB Functions. [En línea]. Disponible en: http://www.artizanetworks.com/lte_resources/lte_tut_fuc.html. [Último acceso: Nov 2016].
- [18] S. Communications, "LTEnet Evolved Packet Core," [En línea]. Disponible en: <http://www.sirran.com/en/software/ltenet-lte-epc> [Último acceso: Nov 2016].
- [19] E. Dahlman et al., "Key features of the LTE radio interface," *Ericsson Review*, no. 2, 2008. [En línea]. Disponible en: http://www.3g4g.co.uk/Lte/LTE_WP_0805_Ericsson.pdf [Último acceso: Nov 2016]
- [20] J. S. Erik Dahlman, Stefan Parkvall, *4G LTE/LTE-Advance for Mobile Broadband*. Elsevier, 2011.
- [21] Y. Zaki, "Future Mobile Communications: LTE Optimization and Mobile Network Virtualization," Facultad de Física e Ingeniería Eléctrica, Universidad de Bermen, 2012.
- [22] F. Rayal, "LTE in a Nutshell : The Physical Layer," Telesystem Innovations, 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.tsiwireless.com/docs/whitepapers/LTE%20in%20a%20Nutshell%20-%20Physical%20Layer.pdf> [Último acceso: Nov 2016].
- [23] A. Ghosh y R. Ratasuk, *Essentials of LTE and LTE-A*. Cambridge University Press, 2011.
- [24] M. Narcís Cardona et al., *3GPP LTE: Hacia la 4G móvil*, Marcombo. Barcelona, 2011.
- [25] H. Holma y A. Toskala, *LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced: Second Edition*. 2011.
- [26] J. Sallent Roig et al., *Fundamentos de Diseño y Gestión de Sistemas de Comunicaciones Móviles Celulares*, 1st ed. Barcelona: Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC, 2014.
- [27] N. J. Quintero, "Advanced Power Control for UTRAN LTE Uplink," Master of Science, tesis, Departamento de Sistemas Electrónicos, Universidad de Aalborg, 2008.



- [28] S. Sesia, I. Toufik y M. Baker, *LTE – The UMTS Long Term Evolution from Theory to Practice*, John Wiley & Sons, 2009.
- [29] M. Chiang et al., *Power Control in Wireless Cellular Networks*, vol. 2, 2008.
- [30] F. R. Porto y S. Andersson, *Optimizing Wireless Communication Systems*. Stockholm: Springer, 2009.
- [31] J. Rohwer y T. Abdallah, "Power Control Algorithms in Wireless Communications," [En línea]. Disponible en: http://ece-research.unm.edu/controls/papers/Roh_CTA_Ose.pdf [Último acceso: Nov 2016].
- [32] Sharetechnote. "Power Control." [En línea]. Disponible en: http://www.sharetechnote.com/html/PowerControl_LTE.html [Último acceso: Nov 2016].
- [33] A. Simonsson y A. Furuskär, "Uplink power control in LTE - Overview and performance: Principles and benefits of utilizing rather than compensating for SINR variations," *IEEE Veh. Technol. Conf.*, 2008.
- [34] S. Stefania, T. Issam, y B. Matthew, *LTE, the UMTS long term evolution: from theory to practice*, John Wiley & Sons, 2011.
- [35] N. S. Networks, "LTE RPESS Radio Planning Essentials."
- [36] ETSI, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (3GPP TS 36.213 version 12.4.0 Release 12)," Feb. 2015.
- [37] O. Perez, Cuatro enfoques metodológicos para el desarrollo de Software RUP – MSF – XP - SCRUM. Facultad de Ingeniería Uniminuto, 2011. [En línea]. Disponible en: <http://biblioteca.uniminuto.edu/ojs/index.php/Inventum/article/view/9/9> [Último acceso: Nov 2016].
- [38] L. Brownsword y B. Gallagher, "The Rational Unified Process® and the Capability Maturity Model – Integrated Systems / Software Engineering," Software Engineering Institute, Universidad Carnegie Mellon, 2001. [En línea]. Disponible en: <http://www.sei.cmu.edu/library/assets/rup.pdf> [Último acceso: Nov 2016].
- [39] C. Arteaga y E. Martínez, "Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE," tesis, Universidad del Cauca, Colombia, 2014.
- [40] D. Medina y D. Ante, "Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE con Planificadores de Recursos Radio Integrados," Universidad del Cauca, Colombia, 2015.
- [41] M. Zambrano y V. Moreno, "Algoritmo de Reúso de Frecuencia para el Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE," Universidad del Cauca, Colombia, 2015.
- [42] ETSI, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios (3GPP TR 36.942 version 11.0.0 Release 11)," 2012.



- [43] J. Rábanos, “Visión General Acceso Radio LTE.” Universidad Politécnica de Madrid, España.
- [44] Huawei, “LTE FDD Optional Feature Description.” HUAWEI TECHNOLOGIES CO, China, 2014.
- [45] ETSI, “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 12.7.0 Release 12),” May 2015.
- [46] EcuRed, “Pruebas de RUP.” [En línea]. Disponible en: https://www.ecured.cu/Prueba_de_RUP. [Último acceso: Oct 2016].