

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica



TRABAJO DE DIPLOMA

**Evaluación del efecto de modificar los
parámetros involucrados en la decisión de
Handover en LTE cuando se utiliza el evento A5.**

Autor: Yadiel García Rosado

Tutor: M.Sc Carlos A. Rodríguez López

Santa Clara

2016

"Año 58 de la Revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica



TRABAJO DE DIPLOMA

**Evaluación del efecto de modificar los
parámetros involucrados en la decisión de
Handover en LTE cuando se utiliza el evento A5.**

**Tesis presentada en opción al grado de
Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica**

Autor: Yadiel García Rosado

E-mail: yrosado@uclv.cu

Tutor: M.Sc Carlos A. Rodríguez López. Prof Auxiliar

Dpto. de Telecomunicaciones, Facultad de Ing. Eléctrica, UCLV

E-mail: crodrigz@uclv.edu.cu

Santa Clara

2016

"Año 58 de la Revolución"



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Yadiel García Rosado
Autor

Fecha

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Yadiel García Rosado
Autor

Fecha

Vitalio Alfonso Reguera, Dr.C
Jefe del Departamento

Fecha

Responsable de Información Científico-Técnica

Fecha

PENSAMIENTO

“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad”.

Albert Einstein

DEDICATORIA

A mis padres y mi hermana por su apoyo incondicional, por haber estado en todo momento a mi lado, por sus desvelos, por darme aliento y fuerzas en los momentos difíciles y por ser la razón de mi ser y el motivo de toda superación.

A toda mi familia que ha compartido conmigo mis alegrías y mis tristezas y siempre estuvieron pendientes y apoyándome en lo que necesitaba.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a mi tutor Carlos Rodríguez (Carlitos) por su trabajo, disposición, paciencia y tiempo que han hecho posible la realización de este trabajo.

A todos los que de una forma u otra me ayudaron en mi formación personal y profesional...

RESUMEN

Dentro de los últimos estándares de comunicaciones móviles están LTE y LTE-A. Estos utilizan el HO duro para garantizar una continua movilidad. Optimizar cuando realizar el HO y sus mecanismos ha sido el objetivo de muchas investigaciones. Al considerar la pérdida de paquetes y la demora es posible evaluar el efecto en la QoS de ejecución del HO. En este trabajo se realiza un estudio del impacto del HO en la calidad percibida por los usuarios de servicios de voz en LTE. Se obtienen resultados que permiten evaluar la alta influencia entre los parámetros escogidos y la QoS al utilizar el evento A5 para la decisión de HO.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	V
TABLA DE CONTENIDOS.....	VI
INTRODUCCION:.....	1
CAPÍTULO 1 CARACTERÍSTICAS GENERALES Y MOVILIDAD EN LTE	5
1.1 INTRODUCCIÓN	5
1.2 SISTEMAS MÓVILES CELULARES.....	5
1.3 LTE Y LTE-A.....	9
1.3.1 <i>Arquitectura de red</i>	10
1.3.2 <i>Planificación de paquetes:</i>	12
1.3.3 <i>Flexibilidad espectral:</i>	12
1.3.4 <i>Tecnologías del nivel físico. OFDMA, SC-FDMA y MIMO</i>	13
1.3.5 <i>Calidad de servicio:</i>	14
1.3.6 <i>Otras características de LTE-A</i>	15
1.4 MOVILIDAD EN LTE	17
1.4.1 <i>Tipos de HO</i>	18
1.4.1.1 <i>HOs duros y suaves</i>	18
1.4.1.2 <i>HO verticales y horizontales</i>	19
1.4.1.3 <i>Seamless y lossless</i>	20
1.4.2 <i>Procedimiento de HO</i>	20
1.4.2.1 <i>Fase de preparación</i>	21
1.4.2.2 <i>Fase de ejecución</i>	21
1.4.2.3 <i>Fase de completamiento</i>	21
1.4.3 <i>Configuración de mediciones</i>	21
1.4.4 <i>Patrones de intervalos de medición</i>	23
1.4.5 <i>Tiempo de interrupción de HO</i>	24
1.4.6 <i>Eventos disparadores</i>	25
1.4.6.1 <i>Evento A5</i>	25
CAPÍTULO 2 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN 29	

2.1	INTRODUCCIÓN	29
2.2	ESCENARIO DE SIMULACIÓN	29
2.3	MODELO DE MOVILIDAD	31
2.4	MODELO DE RADIO PROPAGACIÓN	32
2.4.1	<i>Pérdidas de trayecto</i>	32
2.4.2	<i>Desvanecimiento por ensombrecimiento</i>	34
2.4.3	<i>Desvanecimiento por multitrayecto</i>	34
2.4.4	<i>Ruido</i>	35
2.4.5	<i>Interferencia</i>	35
2.5	RELACIÓN SEÑAL A RUIDO EN EL UE	36
2.6	FACTOR R	37
2.7	MODELACIÓN DE LA PÉRDIDA DE PAQUETES	37
2.8	MODELACIÓN DE LA DEMORA	38
CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN		41
3.1	INTRODUCCIÓN	41
3.2	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA SIMULACIÓN	42
3.3	EXPERIMENTO 1	42
3.4	EXPERIMENTO 2	45
3.5	EXPERIMENTO 3	47
CONCLUSIONES:		49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:		50

INTRODUCCION:

La tecnología de los sistemas de comunicaciones móviles avanza a una velocidad vertiginosa cada año, y muchos son los atractivos que trae consigo. Esto ha derivado a que haya un aumento del número de usuarios de telefonía móvil, esto y la demanda creciente de aplicaciones de banda ancha, entre las cuales se encuentra la navegación por internet de alta velocidad, los juegos en línea, descarga de contenidos multimedia, video streaming (también denominado lectura en continuo, difusión en flujo, lectura en tránsito, descarga continua), entre otros, ha acarreado un necesario aumento progresivo de las velocidades de transmisión de datos a través de estas redes.

El Proyecto Asociación de Tercera Generación (3GPP) es una colaboración de grupos de asociaciones de telecomunicaciones, encargadas de asentar las especificaciones de un sistema global de comunicaciones, así como sus estandarizaciones. De este modo 3GPP ha desarrollado las redes de Evolución a Largo Plazo (Long Term Evolution, LTE), un sistema capaz de mejorar considerablemente la experiencia del usuario con total movilidad. LTE utiliza el protocolo de internet (IP) para realizar cualquier tipo de tráfico de datos de extremo a extremo con una buena calidad de servicio (QoS), entre ellos el tráfico de voz, soportado en Voz sobre IP (VoIP).

VoIP es un grupo de recursos que posibilitan la transmisión de la señal de voz sobre redes utilizando protocolo IP. La voz se envía de forma digital en paquetes IP en lugar de enviarla en forma analógica mediante la conmutación de circuitos, como se hace en la Red Telefónica Pública Conmutada (PSTN). VoIP tiene numerosas ventajas: reducción de costos de mantenimiento, instalación y conmutación de llamadas, mayor escalabilidad, facilidad para la incorporación de nuevos servicios y movilidad de los usuarios.

El estándar de comunicaciones LTE fue diseñado para migrar los servicios de voz basados en la conmutación de circuitos hacia la conmutación de paquetes, sin embargo, esta tecnología al estar soportada sobre IP presenta varios retos para

INTRODUCCIÓN

los operadores, como: la necesidad de entrega de paquetes en orden, tasa de entregas constantes, control del tráfico de datos, entre otros. IP es un protocolo de datagramas en el que no se asegura la entrega de paquetes ni su orden, por lo que debido a esto, en una llamada se pueden producir problemas. El transporte de voz sobre IP y por consiguiente la calidad que percibe el usuario, se pueden ver afectadas por factores como la latencia, la variación de la demora o jitter, el códec utilizado, la razón de pérdidas de paquetes. Uno de los factores más importantes es la demora total o MTE (del inglés *mouth to ear*), que considera la demora del transmisor (codificación y *look-ahead*), la demora de red (colas y transmisión de los paquetes), y la demora del receptor (*dejitter* y decodificación). Pero, esta demora MTE también se ve afectada por otro fenómeno: el traspaso del equipo de usuario (UE, *user equipment*) de una estación base a otra durante una comunicación de voz, conocido como *handover* (HO). El tiempo de interrupción provocado por un evento de *handover*, así como la frecuencia con que estos ocurren, influye de manera significativa en la calidad del servicio de voz[1].

Para evaluar la calidad de los servicios de voz percibida por el usuario se pueden aplicar algunos de los modelos de medición de calidad. El MOS (*Mean Opinion Score*) es la métrica subjetiva más comúnmente utilizada con este fin, este es un proceso bastante complejo. Existen otros modelos propuestos por la UIT que se basan en la señal recibida por el UE, entre los que se pueden destacar modelos de evaluación perceptual de la calidad de la voz (por ejemplo, PESQ) y modelos computacionales, como el Modelo E.

Este trabajo es inspirado por [1] quien en el 2015 propuso un mecanismo para medir el efecto del HO en la calidad de la experiencia del usuario utilizando el evento A3. En este trabajo se pretende realizar un estudio del impacto de los mecanismos de *handover* en la calidad percibida por usuarios de servicios de voz en redes LTE mediante simulación utilizando el Factor R como parámetro de calidad, del antes mencionado Modelo E y utilizando el evento A5. El Factor R tiene en cuenta la pérdida de paquetes y la demora para medir la afectación de la

INTRODUCCIÓN

calidad percibida al realizar HO. Por ello en este trabajo se presenta como interrogante:

¿Cómo afecta la modificación de los parámetros involucrados en la decisión de Handover en LTE cuando se utiliza el evento A5?

Para dar respuesta a esta interrogante se planteó como objetivo general de este trabajo:

Evaluar el efecto de modificar los parámetros involucrados en la decisión de Handover en LTE cuando se utiliza el evento A5.

Para dar cumplimiento a este objetivo son trazados los siguientes objetivos específicos:

1. Realizar un estudio bibliográfico de las tecnologías involucradas en la investigación.
2. Clasificar los tipos de Handover existentes en redes LTE y analizar el impacto que tienen sobre los parámetros que inciden en la calidad percibida por usuarios de servicios de voz.
3. Implementar un modelo que permita a partir de simulaciones utilizando el evento A5 medir el impacto del *handover* en la calidad percibida por usuarios de servicios de voz en redes LTE.
4. Presentar una valoración crítica de los resultados obtenidos a partir de la realización de las simulaciones.

El presente trabajo consta de introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones y referencias bibliográficas.

En el primer capítulo se describen las características generales del estándar de comunicaciones móviles LTE y los aspectos claves relacionados con la movilidad.

En el segundo capítulo se presentan las características del modelo de simulación. Se establecen los valores de los parámetros para la modelación del canal de radio

INTRODUCCIÓN

y se selecciona el modelo de movilidad de los usuarios. Además, se expone el modo en que se modelan la pérdida de paquetes y la demora de extremo a extremo.

En el tercer capítulo se evalúa el impacto de la variación de los parámetros involucrados en la decisión de HO basándose en el evento A5. Se exponen los resultados de las simulaciones y se realiza la discusión de los mismos

CAPÍTULO 1 CARACTERÍSTICAS GENERALES Y MOVILIDAD EN LTE

1.1 Introducción

Ante el vertiginoso desarrollo tecnológico donde el uso de Internet y la Telefonía constituyen prioridades para el crecimiento profesional, informativo y espiritual de una considerable parte del planeta se hace necesario la diversificación cada vez más de los servicios móviles. El soporte de servicios en presencia de movilidad es una de las principales característica de estos sistemas que la hace atractiva para los usuarios, aunque esta impone desafíos al sistema en cuanto a mantener los niveles de percepción de calidad esperados.

En este capítulo se presentan, como resultado de una amplia revisión bibliográfica, los aspectos fundamentales de la evolución de los sistemas móviles hasta llegar a la 4G. Se describen también los elementos fundamentales de la Tecnología de Acceso a Radio (Radio Access Technology, RAT) de LTE, se exponen los conceptos claves relacionados con la gestión de movilidad. Todo lo anterior resulta clave para la comprensión de lo que aborda en capítulos posteriores.

1.2 Sistemas móviles celulares.

Los sistemas móviles de primera generación (1G) se desarrollaron a finales de los setenta e inicio de los ochenta. Estos correspondían a todos los sistemas analógicos de telefonía móvil donde la transmisión y recepción de datos se basaban sobre un conjunto de ondas de radio que cambiaban de modo continuo. Dicho sistema presentaba una cantidad de canales analógicos con un ancho de banda de 30 kHz, los cuales estaban distribuidos en una celda con el concepto de reúso de frecuencia para obtener el máximo de capacidad del sistema con la mínima interferencia entre los distintos canales adyacentes. Dado que en la primera generación se tenía un sistema analógico dentro de cada celda (célula) cada canal podía soportar solo un usuario de teléfono móvil a la vez, dicho canal es asignado de manera dinámica y durante la duración de la llamada, por lo que

cualquier usuario se le puede asignar cualquier canal, permitiendo el reuso de la frecuencia. Los canales estaban distribuidos en el espectro asignado por los entes de los distintos operadores en cada país [2].

En esta generación los dispositivos utilizados eran relativamente grandes. Dado que estos dispositivos eran analógicos solamente fue posible transmitir voz, el uso de mensajería instantánea no se había alcanzado aún, por lo que esta tecnología era vista como un avance tecnológico que se desarrollaría en un futuro. La técnica de acceso que utilizaba la primera generación se basaba en FDMA/FDD (Frequency Division Multiple Access / Frequency Division Duplex), por lo que el acceso múltiple de división de frecuencia utilizaba dos frecuencias portadoras diferentes para establecer la comunicación TX (Uplink) y RX (Downlink) [2].

Era una arquitectura simple, poco eficiente y sin calidad de servicio. La calidad de los enlaces era muy baja al igual que su velocidad de conexión, además era un sistema inseguro dado que era fácil escuchar llamadas ajenas con un simple sintonizador de radio, además permitía que muchos se aprovecharan de hacer uso de las frecuencias de los demás cargando el importe de las llamadas a otras personas. El espectro de frecuencia utilizado hacía que la calidad del servicio no fuese el mejor para las diferentes aplicaciones, además de no considerar una plataforma de incorporación de servicios [2].

La segunda generación (2G) de los sistemas móviles celulares fue desarrollada a principios de los 90s y se caracteriza por una digitalización del sistema. Entre los desafíos para este tipo de tecnología fue el digitalizar el acceso al canal de radio, para brindar una mejor calidad de los servicios de voz, mayor seguridad y un uso más eficiente del espectro y la creación de un estándar global. Se introdujeron numerosos métodos de acceso incluyendo las tecnologías de Acceso Múltiple por División del Tiempo (Time Division Multiple Access, TDMA) y Acceso Múltiple por División del Código (Code Division Multiple Access, CDMA). Sistema Global para Comunicaciones Móviles (Global System for Mobile communications, GSM), Comunicaciones Digitales Personales (Personal Digital Communications, PDC) y

cdmaOne son de los ejemplos que caben destacar de los sistemas móviles de 2G [3].

Aunque GSM es el sistema móvil más exitoso comercialmente, debido al incremento en la demanda del acceso a Internet, y a causa de su baja razón de datos (hasta 9.6 kbps), no satisface la calidad requerida en servicios multimedia de alta velocidad. Para superar las limitaciones de los sistemas pertenecientes a la 2G se crean varios sistemas móviles mejorados. El Servicio General de Paquetes vía Radio (*General Packet Radio Service*, GPRS) es un sistema basado en la conmutación de paquetes comúnmente denominado como de 2.5G, que proporciona una mejora significativa en las razones de transmisión de datos comparado con los sistemas de 2G. Es una extensión de GSM para la transmisión de datos mediante la conmutación de paquetes, que proporciona razones picos de transmisión de 171.2 kbps. GPRS dio paso a Razones de Datos Mejoradas para la Evolución de GSM (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*, EDGE) con razones de datos de hasta 384 kbps [4], [1].

Dado a la popularidad de la telefonía móvil en los países desarrollados, la cantidad de usuarios que utilizaban este medio de comunicación vino en crecimiento, por lo que se tuvo la necesidad de brindar un servicio más eficiente para voz, servicios multimedia y de transferencias de datos, la cantidad de usuarios ligadas a la telefonía móvil hizo que los sistemas se saturaran rápidamente, haciendo que la transmisión de grandes volúmenes de información a velocidades altas en terminales inalámbricas y la red fija para aplicaciones de video, audio, video conferencias, conexiones a internet fuesen muy ineficientes, por lo tanto se tuvo la necesidad de mejorar y desarrollar nuevas tecnologías que dieron lugar a la tercera generación (3G). La tercera generación de telefonía móvil, desarrollada a fines de los 90, ha permitido brindar servicios que van más allá de la voz, reúne acceso de radio de alta velocidad y servicios basados en IP (Protocolo de Internet) [2].

El 3GPP estandariza el Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (Universal Mobile Telecommunication System, UMTS), utilizando CDMA de banda

ancha (Wideband CDMA, WCDMA) basada en la técnica de Espectro Extendido por Secuencia Directa (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS)[5]. UMTS es conocido como el sistema sucesor de GSM

El sistema CDMA2000 fue introducido por el 3GPP2 logrando compatibilidad con el existente cdmaOne. Este contaba con distintas fases según iba evolucionando. La primera fase fue la CDMA2000 1X, trabajando con un canal con un ancho de banda de 1.25 MHz ofreciendo velocidades de 144 Kbps para los sistemas móviles y estacionarios. Surge además una nueva fase llamada CDMA2000 3x cuya portadora presenta un ancho de banda de 3.75 MHz, triplicando el ancho de banda del CDMA2000 1X, ofreciendo una mayor capacidad de datos con una transferencia de 2 Mbps. Finalmente, en CDMA2000 1X EV-DO (Evolución de Datos Optimizado), se logró mejorar aún más el sistema logrando tener transferencia de datos mayores a 2.4 Mbps, este tipo de tecnología utiliza técnicas de multiplicación CDMA y TDMA para maximizar la transmisión de información[2].

Para la tercera generación se dan nuevas mejoras en el sistema, sobretodo en la interfaz WCDMA. Estas mejoras permitieron optimizar la tecnología espectral WCDMA dando origen a la tecnología de Acceso de paquetes de Alta velocidad de enlace descendente (HSDPA) conocida como 3.5G. HSDPA consiste en un nuevo canal compartido en el enlace descendente que mejora significativamente la capacidad máxima de transferencia de información ofreciendo velocidades de hasta 14.4 Mbps y puede alcanzar velocidades de hasta 20 Mbps si utiliza antenas con múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), lo que permite brindar mejores tiempos de respuesta en aplicaciones en tiempo real como videoconferencia y juegos. El tipo de codificación y modulación utilizada por HSDPA es la modulación de amplitud en cuadratura (16QAM) y codificación variable de errores, que permitió realizar mejoras en el ancho de banda de 5 MHz del canal de bajada de WCDMA con el objetivo de ampliar el ancho de banda. HSDPA es compatible con las redes GSM/EDGE y UMTS.

La evolución de los sistemas móviles ha estado dominada por tres organizaciones diferentes: 3GPP, 3GPP2/Qualcomm, y el Instituto de Ingenieros Electrónicos y

Eléctricos (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE). El 3GPP se ha encargado de la evolución de los sistemas basados en redes 2G GSM mientras que el 3GPP2 lo ha hecho para las redes 2G cdmaOne. IEEE ingreso en la evolución de los sistemas móviles con la introducción del estándar Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX) que brinda el acceso inalámbrico de banda ancha de última milla como una alternativa al cable y DSL para servicios multimedia de alta velocidad. Al ser GSM la red más exitosa comercialmente de los sistemas móviles de 2G en el mundo, el 3GPP se considera el líder mundial [1].

La Red de Acceso Radio Terrestre Universal 3G (Universal Terrestrial Radio Access Network, UTRAN) ha evolucionado hacia las redes LTE, también conocidas como UTRAN evolucionado (Evolved UTRAN, EUTRAN). Esta es una nueva RAT propuesta por el 3GPP para proporcionar una migración fluida hacia las redes de 4G [1].

En septiembre del 2009, 3GPP propone un estándar de comunicación móvil llamado LTE Avanzado (LTE Advanced, LTE-A) como una evolución del LTE. LTE-A fue formalmente aceptado como un sistema 4G candidato para mejorar el sistema LTE y cumplir con los requerimientos de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales Avanzadas (International Mobile Telecommunications-Advanced, IMT-Advanced).

1.3 LTE y LTE-A

Tanto LTE como LTE-A son RATs basadas enteramente en la conmutación de paquetes, enfocadas en proveer una mejor calidad de los servicios móviles. LTE fue diseñado para proporcionar razones picos de transmisión de datos en los Enlaces Descendente (DownLink, DL) y Ascendente (UpLink, UL) de 100 y 50 Mbps, respectivamente, e incrementar la capacidad, cobertura y velocidad de las redes móviles celulares en comparación con las tecnologías 3G precedentes [6]. LTE-A incrementa la capacidad, cobertura y las razones de transmisión de datos

(hasta 1 Gbps y 500 Mbps para DL y UL, respectivamente) del sistema LTE [7], [1].

1.3.1 Arquitectura de red

LTE está diseñada con el fin de soportar tráfico de conmutación de paquetes con movilidad ininterrumpida, QoS (Quality Of Service, QoS) y latencia mínima. LTE se compone fundamentalmente por el Núcleo de Paquetes Evolucionado (Evolved Packet Core, EPC) y la EUTRAN, juntos conforman el Sistema de Paquetes Evolucionado (Evolved Packet System, EPS).

La red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC proporcionaran de forma conjunta servicios de transferencia de paquetes IP entre los terminales de los usuarios y las redes de paquetes externas como Internet. La calidad de servicio de transferencia de paquetes IP (como por ejemplo la velocidad de transmisión o los retardos admisibles) puede configurarse en función de las necesidades de los servicios finales, cuyo establecimiento se realiza en plataformas externas. Esta transferencia de paquetes IP entre el usuario y la plataforma externa se denomina EPS Bearer Service y la parte de transferencia que realiza E-UTRAN se denomina E-UTRAN Radio Acces Bearer (E-RAB)[8].

Dentro de los cambios respecto a UMTS es que el Controlador de Red de Radio (Radio Network Controller, RNC) es eliminado y sus funciones son incorporadas al Nodo B Evolucionado (evolved Node B, eNB). Debido a la simplificación de la red LTE, todas las funcionalidades de gestión de los recursos de radio, que además incluyen la planificación de paquetes y el mecanismo de HO, se implementan en los eNBs. Los eNBs realizan las funciones de los nodos B, así como los protocolos tradicionalmente implementados en el RNC. Sus funciones principales son la compresión de cabecera, el cifrado y la entrega confiable de los paquetes. En lo que a control se refiere, el eNB incorpora funciones tales como el control de admisión y la gestión de los recursos de radio[9].

El EPS consta de varias interfaces, las cuales todas están basadas en protocolos IP. La red de acceso E-UTRAN está formada por eNBs que proporcionan la

conectividad entre los equipos de usuario (UE) y la red troncal EPC. Un eNB se comunica con el resto de elementos del sistema mediante tres interfaces: Uu, S1 y X2. La interfaz entre E-UTRAN y EPC se denomina S1 y proporciona a la EPC los mecanismos necesarios para gestionar el acceso de los terminales móviles a través de E-UTRAN. La interfaz radio entre los equipos de usuario y E-UTRAN se denomina E-UTRAN Uu. La interfaz X2 constituye la interconexión de los eNB en la EUTRAN[10].

Se utilizan dos entidades lógicas de pasarela: la Pasarela de Servicio (Serving Gateway, S-GW) y la Pasarela de Red de Datos de Paquetes (Packet Data Network Gateway, P-GW). El S-GW actúa como un ancla de movilidad local enviando y recibiendo paquetes hacia y desde el eNB en servicio y el UE. El P-GW realiza la función de interfaz con las redes externas de paquetes de datos. El P-GW también realiza varias funciones IP como la asignación de direcciones, el filtrado de paquetes y el enrutamiento[9].

La Entidad de Gestión de Movilidad (Mobility Management Entity, MME) es el elemento del plano de control que gestiona el acceso a la red y la movilidad. Es una entidad solamente de señalización, de aquí que los paquetes IP de los usuarios no pasan a través de ella. La MME controla la forma en la que el UE interactúa con la red. Una ventaja de contar con una entidad de red aislada para la señalización es que la capacidad de la red para el tráfico puede crecer de forma independiente[8]. En la Figura 1.1 se muestra la arquitectura de red del sistema LTE.

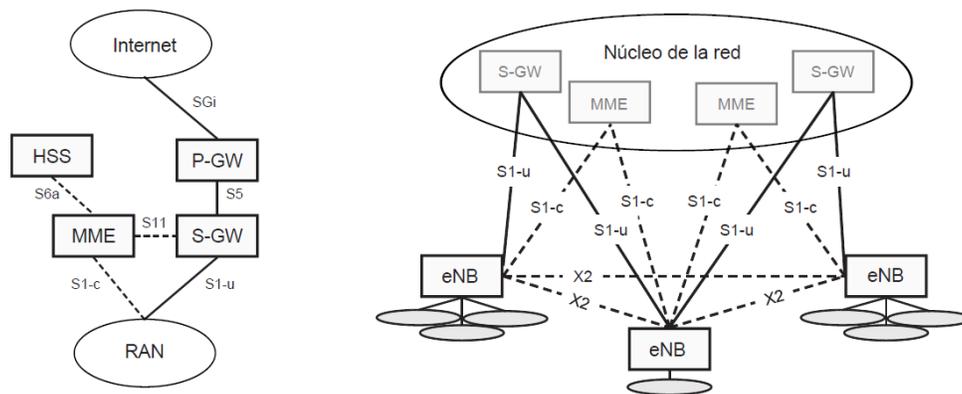


Figura 1.1: Arquitectura de red [11].

1.3.2 Planificación de paquetes:

En LTE la planificación de paquetes es responsable de la asignación eficiente de los Bloques de Recurso Físicos (Physical Resource Block, PRB) en cada Intervalo de Tiempo de Transmisión (Transmission Time Interval, TTI), para la transmisión de los paquetes de usuario en el UL y el DL. El planificador se basa en varios criterios de planificación que deben tener en cuenta satisfacer la QoS, garantizar justicia, y optimizar el desempeño del sistema [11].

Para seleccionar el usuario cuyos paquetes necesitan ser transmitidos en cada PRB se utiliza el algoritmo de planificación en el DL. Este algoritmo tiene en cuenta varios aspectos como parámetros de entrada, tales como el Indicador de la Calidad del Canal (Channel Quality Indicator, CQI), la demora de los paquetes, el estado del buffer, el uso de Bloques de Recurso (Resource Block, RB), entre otros [12]. La CQI es reportada por cada usuario activo al eNB para estimar la calidad del canal [13], [1].

1.3.3 Flexibilidad espectral:

Otra de las características esenciales de le LTE Y LTE-A es la flexibilidad espectral. LTE y LTE-A pueden ser desplegados con diferentes esquemas de duplexación: Duplexación por División de la Frecuencia (Frequency Division Duplexing, FDD), Duplexación por División del Tiempo (Time Division Duplexing, TDD), y FDD semidúplex como se muestra en la Figura 1.2. El modo FDD permite transmisiones simultáneas en el DL y el UL operando en diferentes bandas de frecuencia, mientras que el modo TDD permite transmisiones en el DL y UL operando en la misma banda de frecuencia pero en ranuras de tiempo diferentes. FDD es comúnmente utilizado en espectros pareados, mientras que TDD es usado en espectros no pareados.

LTE y LTE-A da la opción de trabajar con anchos de banda variables: 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz son los valores estandarizados. El uso de una canalización u otra marcará el límite de las tasas de transmisión. Luego dependiendo del ancho de banda disponible los operadores pueden elegir los anchos de banda de

transmisión. LTE y LTE-A pueden operar en diferentes bandas de frecuencia y son compatibles con cualquier sistema que utilice los 900MHz, 2.1GHz y 2.6GHz.

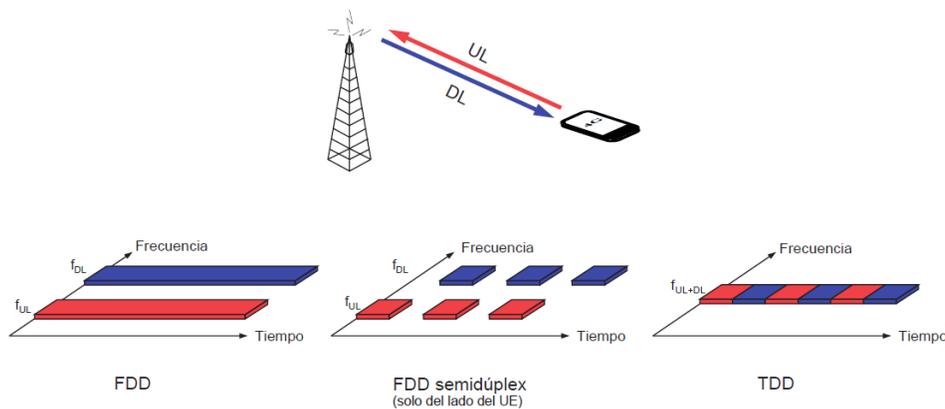


Figura 1.2: Esquemas de duplexación [11].

1.3.4 Tecnologías del nivel físico. OFDMA, SC-FDMA y MIMO

LTE y LTE-A usan en el enlace descendente la técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) y para el enlace ascendente, Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única (Single Carrier Frequency Division Multiple Access, SC-FDMA). Además puede usar la transmisión y recepción con múltiples antenas (MIMO).

OFDMA ofrece la posibilidad de que los diferentes símbolos modulados sobre las subportadoras pertenezcan a usuarios distintos. Por tanto, permite alojar varias transmisiones simultáneas correspondientes a diferentes flujos de información al viajar en subportadoras diferentes. El acceso múltiple se consigue dividiendo el canal en un conjunto de subportadoras que se reparten en grupos en función de la necesidad de cada uno de los usuarios. El sistema se realimenta con las condiciones del canal, adaptando continuamente el número de subportadoras asignadas al usuario en función de la velocidad que éste necesita y de las condiciones del canal. Presenta robustez frente al multitrayecto gracias a la utilización de un prefijo cíclico[8].

OFDM presenta poca eficiencia en el consumo de potencia debido a que la Relación entre Potencia Pico Envolvente de la Señal y la Potencia Promedio (Peak Average Power Ratio, PAPR) es muy elevada, lo que obliga a utilizar amplificadores de alta linealidad. Dado que en el terminal de usuario es crítico reducir el consumo de potencia se utiliza SC-FDMA para el enlace ascendente. Esta es una técnica que combina la robustez frente a la propagación multicamino, con una menor PAPR al reducir el nivel de los picos de potencia en el dominio del tiempo. También genera una pérdida de sensibilidad entre 2 y 3 dB en canales con desvanecimientos.

El sistema MIMO utiliza múltiples antenas tanto para recibir como para transmitir. Una transmisión de datos a tasa elevada se divide en múltiples tramas más reducidas. Cada una de ellas se modula y transmite a través de una antena diferente en un momento determinado, utilizando la misma frecuencia de canal que el resto de las antenas. Debido a reflexiones por multitrayecto, en recepción la señal a la salida de cada antena es una combinación lineal de múltiples tramas de datos transmitidas por cada una de las antenas en que se transmitió [14].

Las tramas de datos se separan en el receptor usando algoritmos que se basan en estimaciones de todos los canales entre el transmisor y el receptor. Además de permitir que se multiplique la tasa de transmisión (al tener más antenas), el rango de alcance se incrementa al aprovechar la ventaja de disponer de antenas con diversidad [15].

1.3.5 Calidad de servicio:

En un caso general, múltiples aplicaciones pueden estar corriendo simultáneamente en el UE, teniendo cada una diferentes requerimientos de QoS. Por ejemplo, un UE puede estar realizando una llamada de VoiP, mientras que al mismo tiempo navega por la web o descarga ficheros. VoiP posee requerimientos más estrictos de QoS en términos de demora y variación de la demora que la navegación web o la descarga de ficheros. Sin embargo, en el caso de la pérdida de paquetes la situación se invierte. La diferenciación de QoS en LTE está dada por la portadora EPS introducida por el 3GPP. Una portadora EPS puede ser del

tipo mínima Razón de Bit Garantizada (Guaranteed Bit Rate, GBR) o del tipo Razón de Bit No Garantizada (Non-GBR, NGBR) [16].

La portadora GBR puede ser usada para aplicaciones como VoIP. Este tipo de portadora tiene un valor GBR asociado, para el cual son asignados permanentemente recursos de transmisión dedicados al establecerse o modificarse la portadora, por ejemplo, mediante una función de control de admisión en el eNB. En caso de que existan recursos disponibles se pueden permitir razones de bits superiores a la GBR. En tales casos, el parámetro Máxima Razón de Bit (Maximum Bit Rate, MBR), que puede también estar asociado a una portadora GBR, establece un límite superior en la razón de bit que puede esperarse. La portadora NGBR no garantiza ninguna razón de bit específica. Este tipo de portadora puede usarse para aplicaciones como la navegación web y la descarga de ficheros. Para estas portadoras no se asignan recursos de ancho de banda de forma permanente [16].

En la red de acceso, es responsabilidad del eNB asegurar la QoS necesaria para una portadora sobre la interfaz de radio. Cada portadora tiene asociado un Identificador de Clase de QoS (QoS Class Identifier, QCI) y una Prioridad de Retención de Asignación (Allocation and Retention Priority, ARP). Cada QCI se caracteriza por una prioridad, un presupuesto de demora de paquetes y una razón de pérdida de paquetes aceptable. La etiqueta de QCI para una portadora determina su tratamiento en el eNB. Se han estandarizado varios QCIs para asegurar que un operador LTE pueda esperar un comportamiento de manejo de tráfico uniforme a través de la red, sin importar el fabricante del equipamiento del eNB. El conjunto de QCIs estandarizados y sus características se muestran en la Tabla 1.1.

1.3.6 Otras características de LTE-A

Varias características esenciales fueron introducidas en LTE-A, incluyendo la Agregación de Portadoras (Carrier Aggregation, CA), mejoras en la multiplicación espacial del DL y el UL, transmisión y recepción Multipunto Coordinada (CoMP), nodos de retransmisión, y compatibilidad de redes heterogéneas [18].

CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS GENERALES Y MOVILIDAD EN LTE

La CA permite que un eNB agrupe varios canales en un canal lógico [19]. Este mecanismo permite a un UE tener hasta cinco Portadoras Componentes (Component Carrier, CC): una portadora primaria y cuatro portadoras secundarias. Como resultado la razón pico de transmisión de datos se incrementa hasta 1 Gbps y 500 Mbps para el DL y el UL, respectivamente, pues el ancho de banda se incrementa desde 20 MHz hasta 100 MHz [20]. Existen tres tipos de CA dependiendo de la posición de las portadoras utilizadas: intra-banda contigua, intra-banda no contigua e inter-banda.

Tabla 1.1: QCI estandarizados en LTE [18].

QCI	Tipo de recurso	Prioridad	Presupuesto de demora	Razón de paquetes perdidos y erróneos	Servicios
1	GBR	2	100	10^{-2}	Llamadas de voz
2	GBR	4	150	10^{-3}	Videollamadas
3	GBR	5	300	10^{-6}	Video bajo demanda
4	GBR	3	50	10^{-3}	Juego en tiempo real
5	NGBR	1	100	10^{-6}	Señalización IMS
6	NGBR	7	100	10^{-3}	Voz y video en vivo, juegos interactivos
7	NGBR	6	300	10^{-6}	Video bajo demanda
8	NGBR	8	300	10^{-6}	Servicios basados en TCP (www, e-mail)
9	NGBR	9	300	10^{-6}	Servicios basados en TCP (www, e-mail)

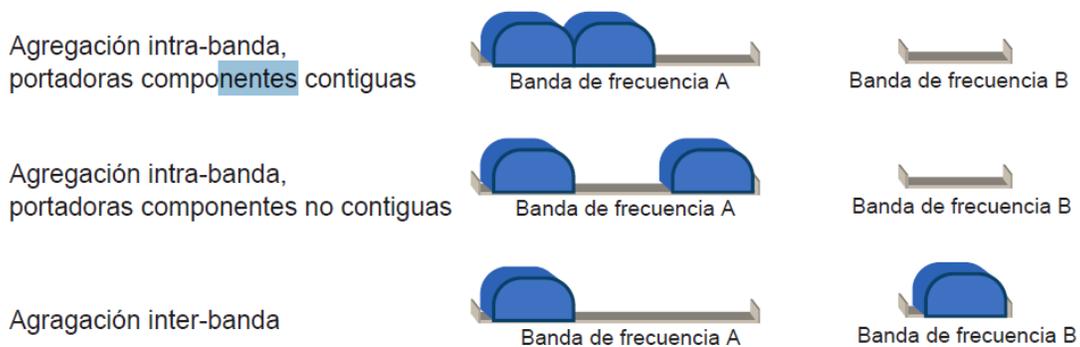


Figura 1.3: Agregación de portadoras en LTE-A [11].

La Transmisión y Recepción (CoMP) es una de las características desarrolladas para LTE – Avanzada, y muchas de sus aplicaciones aún siguen en desarrollo. El multipunto coordinado es principalmente el uso de varias técnicas que hacen posible la transmisión coordinada entre Tx y Rx sobre diferentes estaciones bases. El objetivo es mejorar la calidad del servicio para el usuario y también la mejora de la utilización de la red. El multipunto coordinado en LTE Avanzado convierte la interferencia entre celdas (IEC), en una señal útil especialmente en los bordes de las celdas, donde el rendimiento comúnmente es bajo [21].

Aunque el Multipunto coordinado es una mezcla de técnicas muy complejas tiene muchas ventajas tanto para el operador como para el usuario. Provee conexiones simultáneas a diferentes radiobases, en las cuales los datos pueden ser pasados a través de la radio base menos saturada. Hace el uso de varias celdas para su conexión, esto significa una mejora en la recepción y el número de llamadas rechazadas debe reducir significativamente. La recepción conjunta de múltiples estaciones base permiten aumentar la potencia de recepción por el teléfono. Mediante el uso de técnicas especializadas de interferencia combinadas constructiva es posible reutilizarla, reduciendo así los niveles de interferencia [22].

La adición de repetidores en LTE-A tiene el fin de mejorar la cobertura y la capacidad de la red. En un escenario con repetidores, el UE se comunica con el nodo retransmisor, el cual se comunica con un eNB donante o ancla.

La compatibilidad de redes heterogéneas proporciona cobertura y capacidad en áreas donde es difícil o caro llegar de la manera tradicional [18]. Se refiere al despliegue de celdas con diferentes valores de potencia de transmisión en el DL que operan, de forma parcial, en el mismo conjunto de frecuencias y poseen áreas de cobertura que se solapan. Un ejemplo típico es una pico celda ubicada dentro del área de cobertura de una macro celda [11].

1.4 Movilidad en LTE

La gestión de movilidad es una de las piezas clave que caracteriza a los sistemas de comunicaciones móviles. Un requisito básico que deben satisfacer estos

sistemas es permitir que los usuarios puedan acceder y recibir sus servicios desde cualquier ubicación geográfica donde el sistema disponga de cobertura, dejando aparte posibles limitaciones operativas o restricciones derivadas de las propias condiciones de uso de los servicios.

Un elemento fundamental en la movilidad es el HO, mecanismo que consiste en el traspaso de una BS a otra, o de un sector a otro en la misma BS, mientras el terminal está en modo RRC CONNECTED, es decir, mientras se mantiene una sesión de datos o una llamada de voz. La función del HO es conmutar la conexión desde la BS en servicio (fuente) hacia una BS objetivo para mantener la conectividad del UE. Por tanto, el HO debe realizarse con demora y pérdida de paquetes imperceptibles para las llamadas de voz, y con transmisión confiable para los servicios de datos. Los HOs rápidos y sin ataduras (seamless) son particularmente importantes para los servicios sensibles a la demora tales como VoIP. Cuando un UE se mueve de una BS a otra, el nivel de la señal recibida en el UE proveniente de la BS en servicio comienza a disminuir, mientras que el nivel de la señal de otra BS cercana comienza a incrementarse. El HO puede ser disparado teniendo en cuenta diferentes aspectos según el mecanismo de HO considerado [9].

1.4.1 Tipos de HO

Los HOs se pueden clasificar en dependencia de las características que se tomen como referencia. Así, se pueden clasificar en HOs duros o suaves, verticales u horizontales, sin ataduras (seamless) o sin pérdidas (lossless). Además, el HO en LTE puede clasificarse en inter-frecuencia o intra-frecuencia, basado en S1 o basado en X2.

1.4.1.1 HOs duros y suaves

Se definen 2 tipos de HO teniendo en cuenta si se interrumpe o no la conexión del UE con la red durante un corto período de tiempo: hard HO o HO duro (conocido también como break before make) y softHO o HO suave (conocido como make before break). El comportamiento del HO duro es que el servicio con la BS destino

inicia después de que la conexión con la BS en servicio fue cerrada, debido a que puede estar conectado con solo una BS a la vez. El uso de este HO minimiza la demora del proceso al reducir la complejidad del HO, aunque tiene como inconveniente que introduce un tiempo de interrupción en la comunicación entre el UE y el eNB. Para la variante HO suave el UE siempre mantiene al menos un enlace de radio activo con la red móvil, por lo que no se produce interrupción. Sin embargo, este tipo de HO requiere de funcionalidades extras en el UE para mantener más de una conexión, y también necesita un mayor número de procedimientos de señalización [5]. En LTE solo se utiliza el HO duro.

1.4.1.2 HO verticales y horizontales

El HO también se puede clasificar en otras dos categorías: HO vertical y HO horizontal [23]. Los HOs verticales son aquellos en los que intervienen diferentes RATs. Pueden ser realizados dentro de la misma familia de tecnologías, por ejemplo de LTE a WCDMA o de LTE a GSM, o puede involucrar diferentes familias de tecnologías, por ejemplo de LTE a WiMAX. Por otra parte, el HO horizontal se refiere a aquel que se realiza dentro de la misma tecnología de red [24].

En este aspecto, el 3GPP define el HO intra-LTE y el inter-RAT, siendo el primer tipo aquel en el que tanto la BS en servicio como la BS objetivo pertenecen a LTE, y el segundo tipo aquel en el que una de las dos BSs pertenece a LTE y la otra pertenece a una RAT que no es LTE. Además, el HO intra-LTE se puede subdividir en intra-frecuencia o inter-frecuencia dependiendo de si la celda objetivo se encuentra en la misma frecuencia o no, así como en HO basado en X2 o HO basado en S1 dependiendo de la interfaz que es utilizada para el intercambio de los mensajes de señalización durante la fase de preparación de HO. En el HO basado en X2 los mensajes de señalización son intercambiados directamente entre los dos eNBs sin la intervención de la MME. El HO basado en X2 es menos complejo y está optimizado para tráfico en tiempo real, mientras que el HO basado en S1 es necesario cuando la interfaz X2 no puede ser usada (o no existe) o cuando debe cambiarse la MME [25].

1.4.1.3 Seamless y lossless

El objetivo del HO seamless es brindar una QoS determinada cuando el UE se mueve del área de cobertura de una celda al área de cobertura de otra celda. En LTE este tipo de HO es aplicado a todas las portadoras de radio que llevan datos del plano de control y a aquellas portadoras del plano de usuario mapeadas en Modo Sin Reconocimiento del Control de Enlace de Radio (Radio Link Control-Unacknowledged Mode, RLC-UM). Estos tipos de datos por lo general son tolerantes a pérdidas de manera razonable, pero menos tolerantes a la demora, por ejemplo, los servicios de voz. Por tanto, el HO seamless minimiza la complejidad y la demora a pesar de pueden perderse algunas Unidades de Datos de Servicio (Service Data Units, SDUs) [16].

El HO lossless significa que no se pierden datos durante el proceso de HO. Esto se consigue retransmitiendo las Unidades de Datos de Protocolo (Protocol Data Units, PDUs) del Protocolo de Convergencia de Datos de Paquetes (Packet Data Convergence Protocol, PDCP) que no hayan sido reconocidos por el UE antes que el UE abandone la BS en servicio para hacer el HO. Para asegurar que no haya pérdidas las tramas son almacenadas en un buffer de retransmisión y entregadas en secuencia cuando se restablece la conexión. La entrega en secuencia durante el HO puede ser garantizada usando los números de secuencia de PDUs de PDCP. Este tipo de HO puede ser muy conveniente para los servicios que toleran la demora, como la descarga de archivos, y en los que la pérdida de SDUs de PDCP puede disminuir grandemente la razón de datos debido a la reacción de TCP. El HO lossless se aplica al plano de usuario y a algunas portadoras del plano de control que son mapeadas en Modo con Reconocimiento del Control de Enlace de Radio (Radio Link Control-Acknowledged Mode, RLC-AM).

1.4.2 Procedimiento de HO

El procedimiento de HO en LTE es dividido en tres fases: preparación, ejecución y completamiento (Sesia et al., 2009). El procedimiento se inicia con el informe de medición de un evento de HO por parte del UE al eNB en servicio. El EPC no está involucrado en el procedimiento de HO para el manejo del plano de control, o sea,

los mensajes de preparación son intercambiados directamente entre los eNBs. Esto ocurre cuando existe la interfaz X2, de lo contrario se usa la MME para la señalización [27].

1.4.2.1 Fase de preparación

Durante la fase de preparación de HO, los datos fluyen entre el UE y el núcleo de la red de forma normal. Esta fase incluye el envío de mensajes, tales como control de mediciones, que definen los parámetros de medición del UE y luego se envía el informe de medición si el criterio de disparo se satisface. La decisión de HO se toma en el eNB en servicio, que solicita un HO a la celda objetivo y realiza el control de admisión. La solicitud de HO es reconocida por el eNB objetivo [27].

1.4.2.2 Fase de ejecución

Esta fase se inicia cuando el eNB fuente envía un comando de HO al UE. Durante esta fase, los datos son enviados desde el eNB fuente hacia el eNB objetivo, que almacena los paquetes en el buffer. El UE necesita ahora sincronizarse con la celda objetivo y realiza el procedimiento de acceso aleatorio para obtener la asignación de UL y el tiempo de sincronización, así como el resto de los parámetros necesarios. Finalmente, el UE envía un mensaje de confirmación de HO al eNB objetivo, después del cual el eNB objetivo puede comenzar a enviar al UE los datos almacenados [26].

1.4.2.3 Fase de completamiento

En la fase final, el eNB objetivo informa a la MME que el camino del plano de usuario ha cambiado. El S-GW es entonces notificado para actualizar el camino del plano de usuario. En este punto, los datos comienzan a fluir por el nuevo camino hacia el eNB objetivo. Finalmente todos los recursos del plano de control y de radio son liberados en el eNB fuente.

1.4.3 Configuración de mediciones

Para realizar el HO, el eNB debe proveer al UE los datos de configuración necesarios para ejecutar las mediciones. Esto se hace mediante la señalización

RRC dedicada. La configuración es señalizada al UE después de que este se ha conectado a la red. Esta configuración puede ser actualizada por el nuevo eNB en servicio una vez que el UE haya realizado un HO. La configuración de medición consta de cinco parámetros, listados a continuación [26]:

- **Objetos de medición:** representan las fuentes de las mediciones. En caso de que la medición en cuestión sea una medición intra-sistema (intra- o inter-frecuencia), un objeto de medición representa una sola frecuencia portadora LTE. Si el sistema a medir es UMTS, un objeto de medición corresponde a un conjunto de celdas en una portadora UTRAN. Si el sistema a medir es GSM, un objeto de medición representa un conjunto de frecuencias portadoras GSM.
- **Configuraciones de información:** dictan cuando el UE debe enviar un informe de medición al eNB. Estos disparadores se denominan eventos, un concepto similar al utilizado en redes UMTS. La configuración de información también incluye qué tipo de cantidades y cuántas celdas incluir en los informes.
- **Identidades de medición:** se usan para enlazar un objeto de medición con una configuración de información. Mediante la configuración de múltiples identidades de medición es posible enlazar más de un objeto de medición con la misma configuración de información, así como enlazar más de una configuración de información con el mismo objeto de medición. La identidad de medición se usa como un número de referencia en el informe de medición.
- **Configuraciones de cantidad:** define las cantidades de medición y el filtrado apropiado que debe realizar el UE cuando ejecute las mediciones.
- **Intervalos de medición:** son los intervalos de tiempo en los que el UE puede realizar las mediciones. Durante estos intervalos no se planifican transmisiones en ninguno de los dos sentidos, DL o UL. Los intervalos de medición no son necesarios en las mediciones intra-frecuencias, debido a

que el UE ya se encuentra realizando mediciones de las celdas de la portadora en servicio.

Los eventos que son anunciados en las configuraciones de información funcionan de manera similar que en UMTS. Luego de recibir la configuración, el UE monitorea las mediciones, enviando un informe si alguno de los disparadores configurados por los eventos se cumple. Varios eventos han sido especificados por el 3GPP.

En LTE el nivel de la señal está dado por la Potencia Recibida de la Señal de Referencia (Reference Signal Received Power, RSRP) y la calidad, por la Calidad Recibida de la Señal de Referencia (Reference Signal Received Quality, RSRQ). Cualquiera de estas dos cantidades de medición puede ser usada para la evaluación, y es el eNB quien indica cuál.

Los valores de umbral utilizados para los eventos son definidos en las configuraciones de información, y son individuales e independientes unos de otros. Las configuraciones de información también incluyen un valor de Tiempo de Disparo (Time To Trigger, TTT), de manera que un evento debe estar activo por al menos este tiempo para disparar un informe de medición. Con esta información, el UE posee todos los detalles necesarios para realizar las mediciones y reportarlas a la red.

1.4.4 Patrones de intervalos de medición

Se pueden usar mediciones periódicas o disparadas por eventos [26]. Las mediciones intra-frecuencia son realizadas sin necesidad de interrumpir la transmisión o recepción por parte del UE. Cada 200 ms el terminal es capaz de evaluar la señal de hasta 8 celdas vecinas y reportar las mediciones a las capas superiores. Sin embargo, en el caso de las mediciones inter-frecuencia o inter-RAT, el UE debe interrumpir la comunicación con el eNB en servicio para realizar la medición, y posteriormente volver a resintonizarse. En LTE se definen dos patrones de intervalos de medición que pueden ser configurados, ya sea periódicamente o disparados por eventos [28]. Ambos patrones se presentan en la

Tabla 1.2. Se observa que la duración del tiempo de interrupción con el eNB en ambos casos es el mismo, solamente varia el periodo de repetición. La mayoría de las RATs difunden suficientes portadoras pilotos e información de sincronización que permiten que el UE sea capaz de sincronizarse y realizar mediciones dentro de un periodo útil ligeramente superior a 5 ms. Por tanto, un espacio de medición de 6 ms brinda suficiente tiempo adicional para que el UE pueda sintonizarse a la portadora inter-frecuencia y vuelva a la portadora en servicio. Se debe señalar que en el caso en que se utilizan los intervalos de medición, el número de celdas intra-frecuencias que serán medidas en un período de 200 ms será menor que 8 [27].

Tabla 1.2: Intervalos de medición soportados en LTE [27].

Id del patrón	Duración del intervalo (ms)	Período de repetición ms)
0	6	40
1	6	80

1.4.5 Tiempo de interrupción de HO

En el HO intra-LTE el tiempo de interrupción de HO se define como el tiempo entre el final del ultimo TTI que contiene el comando RRC, usado para ejecutar el HO, en el antiguo Canal Físico Compartido del Enlace Descendente (Physical Downlink Shared Channel, PDSCH) y el momento en el que el UE inicia la transmisión del nuevo Canal Físico de Acceso Aleatorio (Physical Random Access Channel, PRACH), sin incluir la demora de procedimiento RRC.

El tiempo de interrupción de HO depende de las demoras de acceso inicial y asignación de ancho de banda después de la decisión de HO. La variación de la demora de acceso inicial puede ser compensada mediante el ajuste de potencia (Kim and Kim, 2010) y los mecanismos de negociación del tiempo de HO (Lee and Kim, 2008). La demora de asignación de ancho de banda puede ser reducida si se usa la oportunidad de acceso preasignado y se realiza la reserva de recursos antes de la ejecución del HO. Ambos mecanismos son usados actualmente en las redes LTE [26].

Cuando se recibe un comando de HO, el tiempo de interrupción debe ser menor que T_{int} calculado en (1.1) [26].

$$T_{int} = T_{busq} + T_{IU} + 20ms \quad (1.1)$$

Siendo:

T_{busq} : tiempo requerido para buscar la celda objetivo si no es conocida;

T_{IU} : tiempo de incertidumbre para encontrar la primera ocasión PRACH disponible en la nueva celda.

El tiempo de incertidumbre puede ser de hasta 30 ms, mientras que el tiempo de búsqueda puede ser considerado 0 ms ya que la celda objetivo ha sido medida por el UE antes de realizar el HO[26].

1.4.6 Eventos disparadores

Cuando las mediciones inter-frecuencia e inter-RAT no se realizan de manera periódica, es necesario indicar de alguna forma al UE que se debe comenzar a evaluar nuevas celdas si el nivel o la calidad de la señal de la celda en servicio no son apropiados. En [26] se definen varios eventos que pueden ser utilizados para disparar el proceso de medición o para decidir si se debe realizar HO. En la Tabla 1.3 se muestran los eventos definidos para LTE.

1.4.6.1 Evento A5

El evento A5 es disparado cuando se cumple que la señal de la celda en servicio cae por debajo de un umbral 1 y la señal de la celda vecina supera un umbral 2. Importante destacar que estas dos condiciones deben cumplirse simultáneamente para que se produzca el HO, Figura 1.4. Además se tienen en cuenta varios parámetros adicionales: histéresis Hys, offset específico de celda O_c , offset específico de frecuencia O_f . El O_c posibilita considerar las características propias de cada celda para disparar el evento, mientras que el O_f posee la misma función para las bandas de frecuencia. El parámetro Hys es configurado por el eNB y puede tomar valores enteros desde 0 hasta 30, mientras que el Offset puede

CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS GENERALES Y MOVILIDAD EN LTE

tomar valores enteros desde -30 hasta 30. El valor real de estos parámetros es el valor informado por el eNB multiplicado por 0.5 [26].

Tabla 1.3: Eventos disparadores en LTE [26].

Tipo de evento	Condición entrada/salida	Descripción
A1	$M_s - Hys > Thresh / M_s + Hys < Thresh$	La señal de la celda en servicio supera un umbral
A2	$M_s + Hys < Thresh / M_s - Hys > Thresh$	La señal de la celda en servicio cae por debajo de un umbral
A3	$M_n + O_{fn} + O_{cn} - Hys > M_s + O_{fs} + O_{cs} + Offset /$ $M_n + O_{fn} + O_{cn} + Hys < M_s + O_{fs} + O_{cs} + Offset$	La señal de la celda vecina supera la señal de la celda en servicio más un offset
A4	$M_n + O_{fn} + O_{cn} - Hys > Thresh /$ $M_n + O_{fn} + O_{cn} + Hys < Thresh$	La señal de la celda vecina supera un umbral
A5	$M_s + Hys < Thresh1 \ \& \ M_n + O_{fn} + O_{cn} - Hys > Thresh2 /$ $M_s - Hys > Thresh1 \ \& \ M_n + O_{fn} + O_{cn} + Hys < Thresh2$	La señal de la celda en servicio cae por debajo de un umbral 1 y la señal de la celda vecina supera un umbral 2

Nota: M_s y M_n son los resultados de medición de las celdas en servicio y vecina, respectivamente. Hys es la histéresis para cada evento. $Thresh$ es un valor umbral configurable para cada evento. O_{fs} y O_{fn} son los valores de offset específico de frecuencia para las celdas en servicio y vecina, respectivamente. O_{cs} y O_{cn} son los valores de offset específico de celda para las celdas en servicio y vecina, respectivamente. M se expresa en dBm en caso de usar RSRP, o en dB en caso de usar RSRQ. O_f , O_c , Hys se expresan en dB. $Thresh$ se expresa en la misma unidad utilizada para M .

Los eventos A1 y A2 pueden ser utilizados para cancelar y disparar, respectivamente, las mediciones inter-frecuencia e inter-RAT. Ambos eventos consideran solamente la celda en servicio. Una vez que el UE esté realizando las mediciones de las celdas vecinas, entonces puede utilizar los eventos A3, A4 o A5 para realizar un HO. El presente trabajo se centra en el evento A5.

Serving becomes worse than thr.1 and neighbour becomes better than thr.2

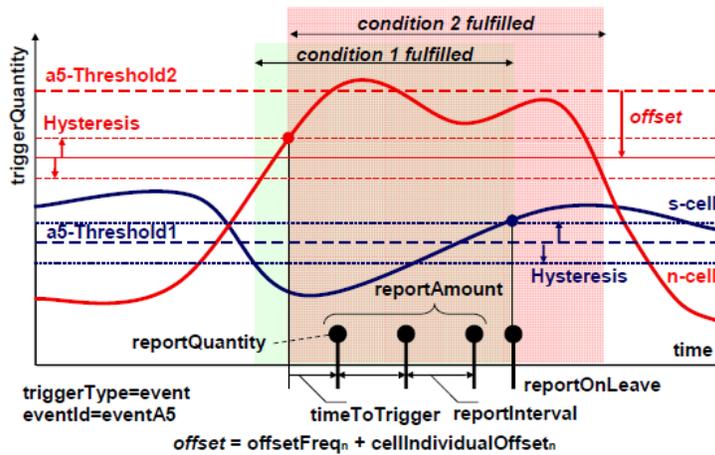


Figura 1.4: Descripción del Evento A5

Si el evento es disparado inmediatamente luego que su condición de entrada se cumple, entonces el HO puede producirse frecuente e innecesariamente en algunos casos. Por ejemplo, considérese un UE que se mueve en la frontera de dos celdas vecinas. La señal que percibe el UE proveniente de ambas celdas fluctuará debido al desvanecimiento lento. El UE se enlazará alternadamente con una y otra celda, produciéndose lo que se denomina efecto ping-pong. Este efecto desperdicia recursos de señalización, disminuye el throughput del sistema, e incrementa la pérdida de paquetes y la demora. Estos dos últimos elementos tienen un impacto significativo en la calidad percibida por los usuarios de servicios de voz. Para disminuir el efecto ping-pong, se utiliza el TTT. Si se cumple la condición de entrada y durante este tiempo, que puede ser configurable, no se cumple la condición de salida entonces el evento es disparado. Utilizar un TTT demasiado alto puede repercutir negativamente en la calidad de servicio, pues el UE tardará más tiempo en realizar el HO, y la señal puede caer hasta un nivel que incremente drásticamente la pérdida de paquetes, produciéndose incluso la interrupción del servicio. Por ello es importante una selección adecuada del TTT. Los valores permisibles de TTT son 0, 40, 64, 80, 100, 128, 160, 256, 320, 480, 512, 640, 1024, 1280, 2560, 5120 en ms [26]. En la Figura 1–8 se muestra la posible ocurrencia de un evento A3, dependiendo del TTT configurado para el UE. Si se selecciona el TTT1 el evento A3 es disparado, pues luego de satisfacerse la

condición de entrada no se cumple la condición de salida antes de que transcurra un tiempo igual a TTT1. Sin embargo, si se selecciona el TTT2, el evento A3 no es disparado, pues la condición de salida se satisface antes de finalizar el tiempo de disparo. En la Figura 1-8 se han utilizado valores de O_i y O_c iguales a cero.

El parámetro medido (RSRP o RSRQ) puede ser filtrado en la capa 3 utilizando (1.2) antes de ser usado para la evaluación de las condiciones que disparan el evento [26]. El filtro permite incluir en la evaluación la historia pasada. El parámetro a define el peso que posee la medición actual, mientras que $(1-a)$ lo hace para las mediciones anteriores.

$$F_i = (1 - a)F_{i-1} + aM_i \quad (1.2)$$

siendo:

M_i : último resultado de medición recibido de la capa física;

F_i : resultado de medición filtrado (actualizado), usado para la evaluación;

F_{i-1} : resultado de medición filtrado (anterior), con F_0 igual a M_1 ;

$a = (1/2)^{(k/4)}$.

El filtrado se realiza en el mismo dominio que el usado para la evaluación del informe de medición, es decir, se usa filtrado logarítmico para mediciones logarítmicas. El parámetro k puede tomar los siguientes valores: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 15, 17 y 19 [26].

CAPÍTULO 2 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

2.1 Introducción

Existen varios métodos para la evaluación de las redes móviles celulares, entre los que se encuentran *testbed*, análisis teórico y simulación. De estos, la simulación es el menos costoso y complicado, haciendo más práctico el estudio de los sistemas móviles a gran escala [28]. La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos para el funcionamiento del sistema [29]. Existen varios simuladores de LTE disponibles en la literatura: A MATLAB-based downlink physical-layer simulator for LTE [30], MATLAB computationally efficient LTE system level simulator [31], y LTE-Sim [32], entre otros. En esta tesis se utiliza un modelo de simulación para la evaluación de la calidad percibida por usuarios de servicios de voz en LTE, basado en Matlab, como en [1].

Este capítulo se recoge los aspectos relacionados con las características del entorno de simulación. Se establecen los valores de los parámetros para la modelación del canal de radio y se selecciona el modelo de movilidad de los usuarios. Además, se expone el modo en que se modelan la pérdida de paquetes y la demora de extremo a extremo.

2.2 Escenario de simulación

El entorno de simulación está basado en el caso 3 del escenario de despliegue de macro celdas del 3GPP [33] y en las recomendaciones de la UIT para la evaluación de RATs para IMT-Advanced [34] usadas también en [35] y en [1]. Se define varios entornos de prueba en [34], con el objetivo de especificar las características comunes para la evaluación de las RATs para IMT-Advanced. Los entornos de prueba propuestos son Indoor, Microcellular, Base Coverage Urban y

High Speed. El ambiente de prueba seleccionado es el Base Coverage Urban, este se centra en el despliegue de macroceldas y cubre desde usuarios pedestres hasta usuarios en vehículos con velocidades superiores. Tiene como característica fundamental la cobertura continua y ubicua en áreas urbanas. Los UEs se encuentran al aire libre, al nivel de la calle, y las BSs superan la altura de las edificaciones circundantes [1].

En el entorno de prueba Base Coverage Urban se proponen dos escenarios de simulación: Urban Macro-cell (UMa) y Suburban Macro-cell (SMa). Ambos escenarios presentan leves diferencias en algunas de sus características, principalmente en la altura y distribución de los edificios y en el efecto que provoca el desvanecimiento lento, dado por su desviación estándar. Se selecciona el escenario SMa con el correspondiente modelo de canal cuando no existe línea de vista. Los parámetros principales que definen este escenario son: desviación estándar del desvanecimiento lento de 8 dB y distancia de correlación de 50 m [1].

La topología que se utiliza está formada por 23 eNB desplegados utilizando una disposición rectangular. Las celdas tienen forma hexagonal con antenas omnidireccionales ubicadas en el centro. La distancia Inter-Celdas (Intersite Distance, ISD) es de 1732 m. En la Figura 2-1 se muestra el escenario con las celdas hexagonales similar a [1]. El área comprendida por el rectángulo de líneas discontinuas es donde se lleva a cabo la simulación.

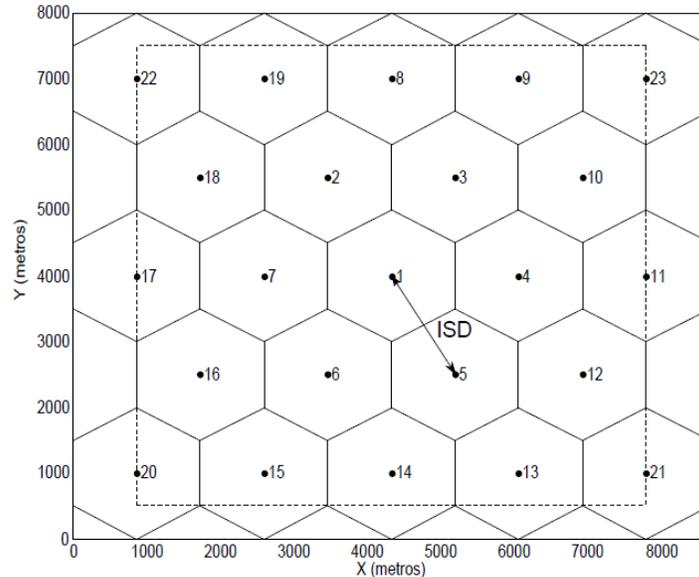


Figura 2–1: Ubicación y forma de las celdas. Tomado de [1]

2.3 Modelo de movilidad

En términos generales, la movilidad es la característica que permite a un dispositivo o usuario desplazarse de un punto a otro sin perder conexión en una red. De este modo, se elimina la exigencia de un punto fijo de conexión a la red y permite a los usuarios la habilidad de moverse físicamente al usar sus dispositivos. La movilidad permite el acceso a servicios de comunicación a cualquier hora y lugar donde sea que se encuentre el usuario [36]. Para realizar la evaluación del desempeño de estos sistemas, es importante entender la movilidad del usuario y desarrollar modelos exitosos. Uno de los modelos más populares es el Modelo de Movilidad por Secuencia de Puntos Aleatorios (Random Waypoint Mobility Model, RWMM).

Fue [37] el primero en proponer el RWMM y ha sido usado por varios investigadores en la evaluación del desempeño de sistemas de redes inalámbricas [38] y de sistemas móviles celulares [39]. Este modelo describe el movimiento del usuario de la siguiente manera [40]:

1. El nodo asume de forma aleatoria una posición inicial (x_0, y_0) dentro del área convexa seleccionada, y un valor de $k=1$.

2. Se elige una nueva posición de destino (x_k, y_k) dentro del área, y se selecciona uniformemente una nueva velocidad v_k del intervalo $[v_{min}, v_{max}]$. El nodo se mueve por el segmento que une las dos posiciones, desde (x_0, y_0) hasta (x_k, y_k) , a una velocidad constante v_k .
3. Si se utiliza tiempo de pausa, el nodo se detiene durante t_p luego de alcanzar la posición (x_k, y_k) , donde t_p es obtenido a partir de una distribución general con función de densidad $f_p(t)$.
4. Se incrementa el valor de k y se regresa al paso 2 hasta que culmine el tiempo de simulación.

En este trabajo se utiliza el RWMM con tiempo de pausa igual cero, por lo que el UE siempre está en movimiento. La velocidad es constante durante todo el tiempo de simulación, pudiendo ser 3, 60 o 120 km/h, con el fin de evaluar las velocidades propuestas en [41]. Cuando el UE llega a uno de los bordes de la región, el usuario modifica su trayecto de manera que el ángulo de reflexión sea igual al ángulo de incidencia.

2.4 Modelo de radio propagación

Cuando se propagan las ondas electromagnéticas desde el transmisor hacia el receptor ocurren múltiples fenómenos que afectan el nivel de la señal recibida [42]. Para los ambientes terrestres los efectos de la propagación se dividen en tres tipos: pérdidas de trayecto, desvanecimiento lento debido al ensombrecimiento y la dispersión, y desvanecimiento rápido debido a los efectos del multitrayecto [33]. La Relación Señal a Ruido más Interferencia (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) que se recibe en el receptor está influenciada por estos tres factores, así como por el ruido de fondo y la interferencia provocada por los eNBs y UEs cercanos [1].

2.4.1 Pérdidas de trayecto

Como resultado de la propagación de las ondas electromagnéticas a través del espacio libre, las pérdidas de trayecto constituyen un descenso de la densidad de

potencia. Este fenómeno es un componente importante en el análisis y diseño del enlace de un sistema de telecomunicaciones. La característica más importante de la propagación por canales móviles es la variabilidad de la propagación, consecuencia del carácter zonal de la cobertura y del desplazamiento de los terminales [43].

En los sistemas móviles la potencia recibida en el UE o la BS disminuye de manera más marcada que en el espacio libre, en función de la distancia. Este efecto es más marcado cuando la distancia es suficientemente grande como para que la diferencia entre la longitud del trayecto directo y el reflejado sea comparable con la longitud de onda de la señal. Bajo esta condición, ambas ondas comienzan a cancelarse debido a que el signo del campo eléctrico de la onda reflejada se invierte [9]. Por tanto, la señal antes de llegar al receptor experimenta una atenuación de $1/d^4$ en lugar de $1/d^2$ como en el espacio libre.

A partir de resultados experimentales se ha demostrado que, para determinados tipos de entorno, las pérdidas de trayecto se pueden modelar mediante una ley exponencial en función de la distancia [44], como se describe en (2.1)

$$L = l + 10n \log \frac{d}{d_0} \quad (2.1)$$

siendo:

l: constante de pérdidas de trayecto;

n: exponente de pérdidas de trayecto;

d: distancia entre transmisor y receptor;

d_0 : distancia de referencia.

La constante de pérdidas de trayecto no es más que el valor de pérdidas de trayecto a una distancia de referencia d_0 , que por lo general es 1 km para macro celdas [44]. El exponente de pérdidas de trayecto describe la rapidez con que disminuye la potencia de la señal al aumentar la distancia. En la modelación de sistemas celulares se asumen valores de n entre 2 y 4 dependiendo del canal inalámbrico [1].

En este trabajo se asumen valores de l y n de 138.7120 y 3.6378 como en [35] y en [1], basados en el modelo COST-231 Hata recomendado en [33].

2.4.2 Desvanecimiento por ensombrecimiento

La variación en la fuerza del campo de la señal de radio causada por la reflexión, la difracción y el fenómeno de apantallamiento debido a edificios, árboles y otros obstáculos que se encuentren en el trayecto entre el UE y la BS se denomina desvanecimiento lento [45]. El desvanecimiento lento (z_i) puede ser modelado como un proceso aleatorio gaussiano lognormal [46] con media cero, desviación estándar σ determinada por el ambiente de simulación, y función de auto correlación exponencialmente decreciente con la distancia, dada por (2.2) [33].

$$R(\Delta x) = e^{-\Delta x/d_{cor}} \quad (2.2)$$

siendo:

Δx : distancia recorrida por el UE entre dos intervalos de muestreo;

d_{cor} : distancia de correlación.

Aunque el modelo es simple los resultados tienen buena fidelidad con respecto a mediciones tomadas en ambientes suburbanos. Para el escenario SMA la distancia de correlación es 50 m y $\sigma = 8$ [33]. La distancia recorrida por el UE Δx es calculada multiplicando la velocidad del UE por el intervalo de muestreo, que es seleccionado de 40 ms para considerar mediciones periódicas con este tiempo de repetición [1].

2.4.3 Desvanecimiento por multitrayecto

La comunicación inalámbrica se lleva a cabo a través de canales de desvanecimiento por trayectos múltiples. Por lo general, la señal transmitida viaja al receptor por una componente directa, si existe una línea de vista, o a través de una multitud de caminos, con amplitudes, fases y tiempos de llegada diferentes. Centrándose en la variable tiempo, a este efecto se le denomina dispersión temporal. En medios rurales los valores de dispersión de retardo son mayores que en medios urbanos, debido a ecos producidos por reflexiones en obstáculos alejados como montañas, en lugar de estructuras relativamente próximas al móvil

[43]. La señal recibida se distorsiona como consecuencia de la dispersión temporal. Esta produce ISI en el dominio del tiempo, y en el dominio de la frecuencia, desvanecimiento selectivo en frecuencia para sistemas de banda ancha.

OFDMA es una tecnología robusta frente a la ISI y al desvanecimiento selectivo en frecuencia [41]. Además, la envolvente de la señal se contamina con el desvanecimiento por multitrayecto en entornos microcelulares, y las predicciones del modelo son menos exactas teniendo en cuenta solo el desvanecimiento lento [47]. En base a estos dos elementos, el desvanecimiento por multitrayecto no es considerado al igual que en [35], [1].

2.4.4 Ruido

El ruido hace referencia a señales no deseadas que están siempre presentes en los sistemas eléctricos. El ruido térmico, es una fuente natural de ruido, que no puede ser eliminada. Este se genera por la agitación térmica de los portadores de carga, generalmente electrones en todos los componentes disipadores (resistores, conductores). Una de las características principales del ruido térmico es que este es aproximadamente blanco, lo que significa que su densidad espectral de potencia es casi plana. [48]. La potencia de ruido térmico en el receptor está dada por (2.3).

$$N = k \cdot T \cdot B \quad (2.3)$$

siendo:

k: constante de Boltzmann;

T: temperatura en Kelvin;

B: ancho de banda en Hz.

El valor de kB es $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K. La densidad espectral de potencia de ruido térmico N_0 , a temperatura ambiente $T=300$ K, es $N_0 = -174$ dBm/Hz. Para un ancho de banda de 10 MHz propuesto en [34] para el escenario SMa, el ruido de fondo total es $N_0 \cdot B = -104$ dBm, valor usado también en [35].

2.4.5 Interferencia

Otra de las fuentes que atenta contra la calidad del radioenlace, incluso más que el ruido, es la interferencia intercelda. Esta ocurre por la reutilización de

frecuencias en celdas vecinas. La interferencia, por lo general, tiene una estructura determinada que la hace al menos en algunos casos predecible, por lo que puede ser reducida y en ocasiones eliminada totalmente. Una de las formas de suprimir la interferencia es el procesamiento espacial mediante el uso de múltiples antenas en el receptor. Además, cualquier diferencia en las propiedades espectrales de la señal objetivo y la señal interferente puede ser usada con el mismo fin [1].

LTE opera con reuso de frecuencia de las celdas, por lo que los mismos recursos pueden ser usados en celdas vecinas. Esto puede conllevar a variaciones relativamente grandes en la SINR, y por lo tanto en las razones de datos. Para disminuir la interferencia intercelda se utiliza la coordinación de la planificación entre celdas. Esta tiene como objetivo, si es posible, evitar las transmisiones con terminales en el borde de la celda de forma simultánea en celdas vecinas [11]. Asumiendo que se utilizan mecanismos como los descritos para disminuir los efectos de la interferencia, en este trabajo no se tiene en cuenta para simplificar la simulación.

2.5 Relación señal a ruido en el UE

La Relación Señal a Ruido (Signal To Noise Ratio, SNR) se usa comúnmente como parámetro para medir la calidad de la conexión. Considerando la pérdida de trayecto, el desvanecimiento lento y el ruido de fondo, la SNR puede ser modelada mediante (2.4) [35]. La SNR es usada en las simulaciones para decidir si el HO debe ser efectuado o no.

$$M_i = p - (l + 10n \log d_i) + z_i - N \quad (2.4)$$

siendo:

p: potencia de transmisión del eNB en dBm;

l: constante de pérdidas de trayecto;

n: exponente de pérdidas de trayecto;

d_i: distancia entre el UE y el eNB en km;

z_i: término de desvanecimiento lento;

N: potencia de ruido en dBm.

2.6 Factor R

El modelo E es descrito en la [49, p. 20]. la fórmula básica del factor R para calcular el factor se muestra en (2.5) [35].

$$R = R_o - I_d - I_{e-eff} \quad (2.5)$$

siendo:

R_o : su valor 93.2. Es el puntaje máximo que puede ser conseguido por los códec de banda ancha y le corresponde un MOS de 4.41.

I_d : factor de deterioro causado por la demora a lo largo de la red (está en función de la demora). Este factor se expresa en la ecuación (2.6)

I_{e-eff} : es el factor de degradación efectiva del equipo, que depende propiamente del equipo (el códec que se usa para formar el flujo de voz) y también de la pérdida de paquetes y la robustez de la pérdida de paquetes. Este factor es expresado por la ecuación (2.7)

$$I_d = 0.024 \cdot D_{mte} + 0.11 \cdot (D_{mte} - 177.3) \cdot H(D_{mte} - 177.3) \quad (2.6)$$

siendo:

D_{mte} : demora de extremo a extremo de la red.

$H(x)$: función de Heaviside.

$H(x)=0$ si $x < 0$

$H(x)=1$ si $x > 0$

$$I_{e-eff} = I_e + (95 - I_e) \frac{P_{pl}}{P_{pl} + B_{pl}} \quad (2.7)$$

siendo:

I_e : factor de degradación del equipo (la calidad del códec). Depende de los resultados de pruebas subjetivas, así como de la experiencia de la red. Según G107.

B_{pl} : es el factor de robustez contra pérdidas de paquetes.

P_{pl} : probabilidad de pérdida de paquetes.

2.7 Modelación de la pérdida de paquetes

A pesar de que la pérdida de paquetes ocurre aleatoriamente y está determinada por mecanismos correctores de errores, los mecanismos de transmisión (como modulación y entrelazado), el parámetro que más influye es la calidad de la señal recibida. La probabilidad de pérdida de paquetes se deteriora rápidamente cuando

la señal cae por debajo de cierto valor umbral δ y puede ser modelada mediante (2.8) [35].

$$P_{pl} = P(F_i < \delta) = Q\left(\frac{F_i - \delta}{\bar{\sigma}}\right) \quad (2.8)$$

siendo:

F_i : SNR filtrada usando (1.2) con $a = 0.5$;

δ : umbral de pérdida de paquetes;

σ : desviación estándar de F_i y se calcula como $0.5\sigma\{1-R(\Delta x)\}$;

$Q(x)$: función complementaria de error.

El valor de δ es un valor constante predefinido por el proveedor de red. En el presente trabajo se utiliza un valor de -4 dB al igual que en [35].

2.8 Modelación de la demora

En VoIP, el códec es el encargado de generar las tramas de voz a partir de la señal del habla. Las tramas son transmitidas a través de la red, y al llegar al otro extremo, los paquetes de voz son almacenados temporalmente en el buffer de reproducción hasta el instante correspondiente. La demora MTE es el tiempo desde que se generan los paquetes de voz hasta su reproducción, esta puede expresarse mediante (2.9) [35].

$$D_{mte} = t_{en} + t_{lh} + \sum_{i=1}^N t_{qu_i} + t_{tx_i} + t_{dj} + t_{de} \quad (2.9)$$

siendo:

t_{en} : demora de codificación;

t_{lh} : demora de análisis para la compresión;

N : suma de los elementos de red en el trayecto que siguen los paquetes de voz;

t_{qu_i} : demora de cola del paquete de voz en el elemento de red i ;

t_{tx_i} : demora de transmisión del paquete de voz en el elemento de red i ;

t_{dj} : demora del buffer de reproducción;

t_{de} : demora de decodificación.

La demora MTE está compuesta por elementos constantes y variables. Los términos variables son: la demora de la red de extremo a extremo y la demora del buffer de reproducción. La suma de t_{en} , t_{lh} , y t_{de} es una constante. La suma de las demoras de cola $\sum_{i=1}^N t_{qu_i}$ es difícil de predecir, excepto en el caso límite de una red Markoviana [35]. Si el trayecto que siguen los paquetes de voz es fijo, la suma

de las demoras de transmisión $\sum_{i=1}^N t_{tx_i}$ ($Nttx_i$) es también en una constante, y la suma de la demora del buffer de reproducción y de la demora de red de extremo a extremo es asintóticamente constante [50], [51].

En [25] se asume una demora de codificación de 30 ms, incluyendo los 20 ms del tamaño de trama, 5 ms de análisis para la compresión y 5 ms de tiempo de procesamiento. Se asumen 5 ms para la decodificación en el extremo receptor y 50 ms de demora en la interfaz aérea, tanto en el UL como en el DL, incluyendo la demora de planificación y el tiempo requerido para la transmisión inicial de un paquete y las retransmisiones HARQ. Se asumen tiempos de procesamiento en el UE, el eNB, y el SAE-GW de 5, 5 y 1 ms, respectivamente, así como una demora de transporte de 10 ms. Basándose en estos valores la demora MTE es aproximadamente 160 ms. En este trabajo se utiliza una demora MTE típica de 180 ms al igual que en [35], [1].

El buffer puede utilizar mecanismos de reproducción fijos, que mantienen la demora MTE constante durante toda la comunicación, o adaptativos, que pueden ajustar el tamaño del buffer en cualquier instante (dentro de ráfagas) o cuando aparecen periodos de silencio (entre ráfagas). A pesar de que ajustar la demora de reproducción en cualquier instante es ventajoso en aquellos casos en los que la demora de red varía rápidamente, también implica un procesamiento complejo de la señal de audio. El ajuste durante los intervalos de silencio, por otra parte, es menos complejo y provee resultados satisfactorios. A pesar de que el tiempo de interrupción de HO es reducido, su escala es mayor que la de la variación de la demora, por lo que el HO dispara el mecanismo de picos del buffer de reproducción e incrementa la demora MTE. De ahí que la demora MTE puede ser modelada como la suma lineal de la demora MTE típica y el tiempo de interrupción de HO [35], [1].

En este trabajo se ha asumido que cuando ocurre un HO el buffer adiciona una demora de 120 ms, al igual que en [35] y [1]. Se utiliza el ajuste durante los intervalos de silencio con el objetivo de evitar el continuo aumento de la demora MTE, de esta forma la demora disminuye hasta el valor típico (180 ms). La traza

CAPÍTULO 2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

con periodos de actividad y silencio se genera de forma artificial según las especificaciones dadas en [52].

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Introducción

Uno de los principales retos para mejorar el desempeño de las redes móviles LTE y demás sistemas móviles celulares es optimizar el número de HO. Si el número de HO es demasiado alto aumenta la demora del flujo de datos que se intercambian entre los usuarios y los eNB. De lo contrario, si el número de HO es insuficiente, puede afectarse la calidad de la señal recibida y por lo tanto aumenta la probabilidad de pérdida de paquetes. Por lo que es imprescindible lograr una relación de compromiso entre demora y razón de pérdida de paquetes para poder mejorar la calidad percibida por los usuarios.

Resulta útil utilizar un mecanismo de HO que sea flexible y permita adaptar los valores de los parámetros para la decisión de HO en función de las condiciones específicas del UE, como son la velocidad o el entorno en el que se encuentra.

En este trabajo se utiliza el evento A5, el cual proporciona cierta flexibilidad. Para determinar el número de HO utilizando el evento A5 se pueden utilizar cuatro vías.

- Mediante la modificación de los parámetros de umbral de la celda en servicio o vecina.
- Variando el parámetro TTT
- Variando el parámetro k.
- Mediante el ajuste de O_c y O_f

En este capítulo se exponen los resultados de simulaciones variando los umbrales, k y TTT, con el fin de analizar la repercusión de cada uno en la decisión de HO. Se presentan 3 experimentos. El experimento 1 se basa en el cálculo de los umbrales tanto de la celda en servicio como la vecina para mejorar la decisión de HO. En el experimento 2 se utilizan valores de umbrales que arrojaron resultados altos de HO y se varía el parámetro k. El experimento 3 evalúa el impacto del filtro de capa 3. Durante todas las simulaciones se contabiliza la cantidad de HOs, se mide la probabilidad de pérdida de paquetes, la demora

promedio, el factor R. En todos los casos se utilizan velocidades constantes de 3, 60 y 120 km/h.

3.2 Características generales de la simulación

En los experimentos una vez que se cumple el criterio de HO, este se lleva a cabo, asumiendo que los eNBs tienen suficientes recursos para soportar el tráfico de voz al igual que ocurre en [35]. En las gráficas los resultados se representan para un nivel de confianza del 95%. En la Tabla 3.1 se muestran los parámetros comunes de simulación [1].

Tabla 3.1: Parámetros comunes de simulación [1].

Parámetro	Valor
Número de eNBs	23
ISD	1732 m
Potencia de transmisión de los eNBs (p)	46 dBm
Ancho de banda por eNB	10 MHz
Frecuencia central	2 GHz
Constante de pérdidas de trayecto (l)	138.7120
Exponente de pérdidas de trayecto (n)	3.6378
Desviación estándar del desvanecimiento lento (σ)	8 dB
Distancia de correlación (d_{cor})	50 m
Potencia de ruido (N)	-104 dBm
Umbral de pérdidas de paquete (δ)	-4 dB
Periodo de intervalos de medición (mediciones periódicas)	40 ms
Modelo de movilidad	RWMM con tiempo de pausa cero

3.3 Experimento 1

En este experimento se varían los niveles de umbrales de la celda en servicio (umbral-1) y la celda vecina (umbral-2). Se considera un valor de Hys=0 dB. El tiempo de simulación es 1800 s, con el objetivo de obtener resultados más precisos.

Al correr las simulaciones se fija el valor del umbral-2 y se hace un barrido del umbral-1, luego se cambia el umbral-2 y se repite el proceso. Los mejores

resultados se obtienen al fijar el umbral-2 en 6. La Figura 3.1 representa los resultados de las simulaciones para 60 km/h de velocidad con $k=0$ y $TTT=0$. La Figura 3.1(a) muestra que para umbrales que están entre -6 dB y 6 dB el número de HOs no se incrementa notablemente. A partir de este punto un incremento de umbral-1 provoca un apreciable aumento del número de HOs. Es importante recordar que en términos generales un aumento del número de HOs garantiza una mejor calidad promedio de la señal, así mismo aumentar el número de HOs provoca un incremento de la demora promedio, debido a la demora de interrupción de HO.

En la Figura 3.1 (b) se aprecia el comportamiento de la probabilidad de pérdida de paquetes de los mismos niveles de umbrales 1 de la Figura 3.1 (a). Como es de esperar la probabilidad de pérdida de paquetes disminuye en la medida en que el umbral-1 aumenta. Sin embargo el comportamiento es tal que a partir de -3 dB de SNR la mejora en la Ppl no es apreciable. La Figura 3.1 (c) representa el comportamiento de la demora y se puede apreciar que en el incremento de la demora que resulta del número de HOs que se produce no es notable hasta un umbral-1 de 8 dB.

Se destaca que atendiendo al modelo E, dentro de determinados rangos, la Ppl tiene una mayor repercusión en la calidad que el incremento de la demora. La Figura 3.1 (d) representa el Factor R calculado en función de Ppl y la demora. Se puede apreciar que para valores umbral-1 de desde -6 dB hasta -3 dB crece notablemente como resultado de la disminución de la Ppl, como se describe en la Figura 3.1 (b). A partir de ese punto desde -3 dB hasta 6 dB el cambio en el Factor R no es notable como resultado de que se mantengan casi constantes el número de HOs y la demora. A partir de 6dB se decreta el Factor R, y por consiguiente la percepción de la calidad, a causa del aumento de la demora que resulta del incremento del número de HO.

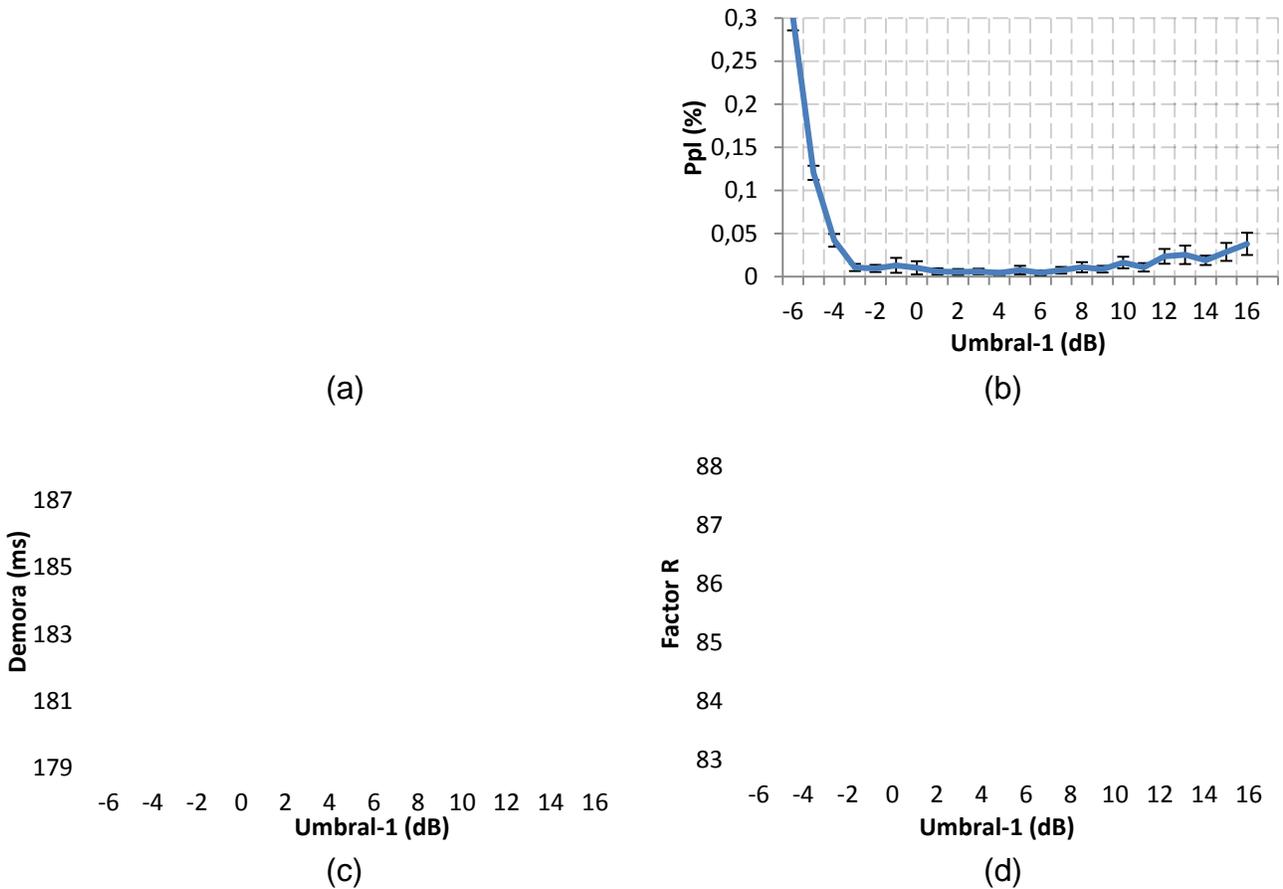


Figura 3.1 Resultados parciales del experimento 1: (a) Número de HOs; (b) probabilidad de pérdida de paquetes; (c) Demora MTE; (d) Factor R

En la Figura 3.2 (a) se muestra el comportamiento de la cantidad de HOs con respecto a diferentes velocidades. A una velocidad de 3 km/h y dentro del rango del umbral-1 de -6 dB a 11 dB no se aprecia un aumento considerable de la cantidad de HO, debido a que los usuarios se mueven a velocidades bajas y estos no realizan una gran cantidad de HO. A partir de 11 dB aumenta la cantidad de HOs. Nótese que mientras mayor es el umbral-1 menor es el deterioro en la calidad de la señal permitido antes de valorar realizar un HO. Dicho de otra forma, aumentar el umbral-1 es una forma de estimular la ejecución del HO. A la velocidad de 60km/h el aumento de los HOs empieza en nivel de umbral-1 de 8 dB, este empieza antes por consecuencia de un mayor desplazamiento. Lo mismo ocurre a 120 km/h en 6 dB.

La figura 3.2 (b) representa la demora MTE. El aumento de la demora coincide con los puntos donde se incrementa significativamente la cantidad de HOs

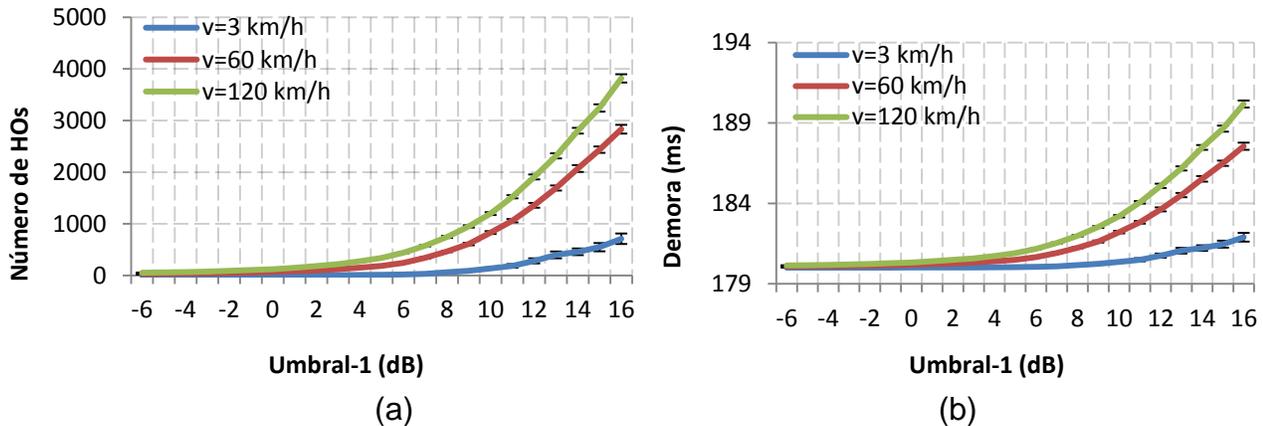


Figura 3.2 Resultados del experimento 1 comparando las velocidades: (a) Número de HOs; (b) Demora MTE.

3.4 Experimento 2

En este experimento se evalúa el impacto de modificar el valor de filtro k con el objetivo de eliminar HOs innecesarios, como resultado de variaciones instantáneas de la señal. Para mostrar solamente el efecto de la variación del filtro se considera el TTT=0. Se realizan simulaciones variando los valores de k y se utilizaron valores de Umbral-1= 12 y Umbral-2= 6 por la cantidad significativa de HO que se llevan a cabo.

Al aumentar la velocidad del UE la diferencia entre las mediciones de 2 muestras consecutivas aumenta. Como resultado puede ocurrir que en un instante de tiempo el UE puede tener buena calidad de SNR y en la siguiente medición la señal puede encontrarse en niveles críticos de señal lo cual trae como consecuencia niveles de perdida de paquetes inaceptables. Se utilizan valores de velocidad de 3, 60 y 120 km/h para ver el efecto que esta provoca. El tiempo de simulación es de 30 minutos.

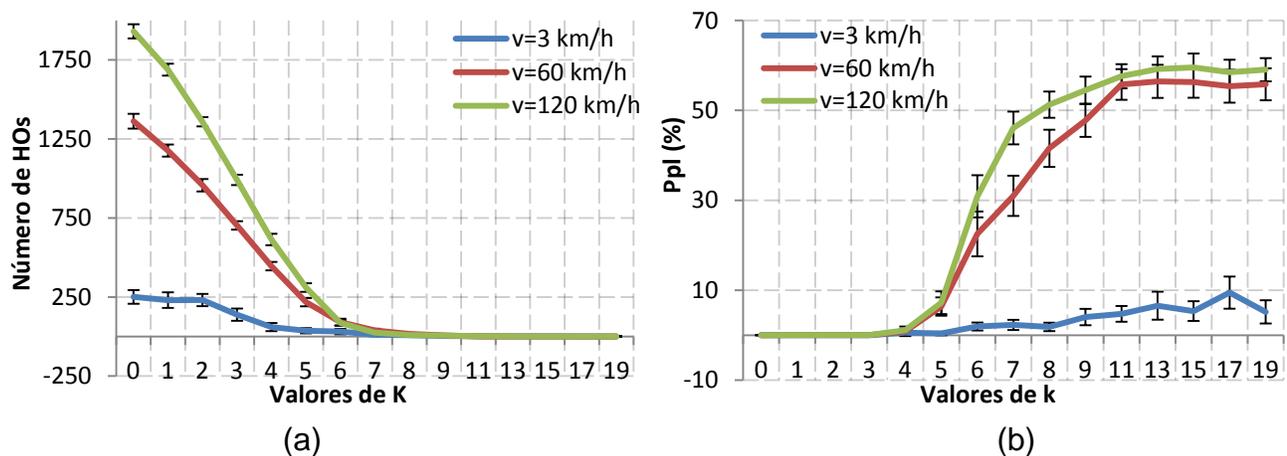
En la figura 3.3 se observan los resultados de las simulaciones para las tres velocidades antes mencionadas. La figura 3.3 (a) muestra que para las velocidades de 60 y 120 km/h el efecto de aumentar k es más notable, provocando

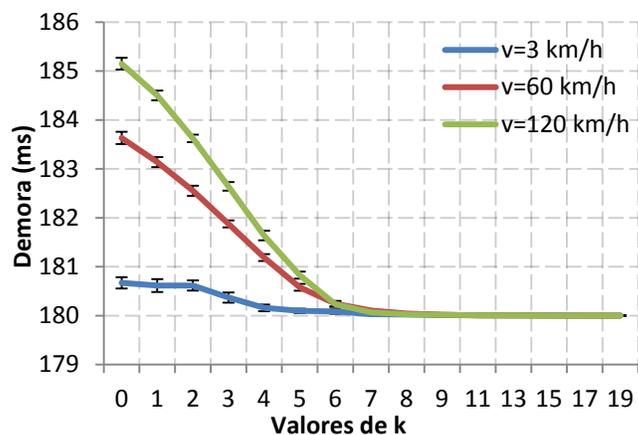
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

que la cantidad de HO disminuya. Sin embargo para la velocidad de 3 km/h la repercusión del filtro es menor. A partir de un valor de $k=6$ prácticamente no se producen HO.

En la figura 3.3 (b) se puede apreciar el efecto sobre la pérdida de paquetes que tienen el filtrado y la velocidad. La pérdida de paquetes tiene un comportamiento semejante para las velocidades de 60 y 120 km/h, para estos un aumento de los valores de k deteriora de manera significativa la señal al aumentar la pérdida de paquetes. De igual forma que ocurre con la cantidad de HOs el efecto del aumento de k sobre los UE que se mueven a 3 km/h en la pérdida de paquetes es menor. Para velocidades de 60 y 120 km/h un valor de k superior a 5 representa valores de pérdidas de paquetes inadmisibles para los servicios de voz.

Un valor adecuado de k reduce el efecto ping pong y disminuye los HOs innecesarios. Sin embargo, si k es demasiado alto el efecto de filtrado provoca que el usuario permanezca en el mismo eNB aun cuando la señal recibida cae por debajo de niveles críticos.





(c)

Figura 3.3 Resultados parciales del experimento 2: (a) Número de HOs; (b) probabilidad de pérdida de paquetes; (c) Demora MTE.

3.5 Experimento 3

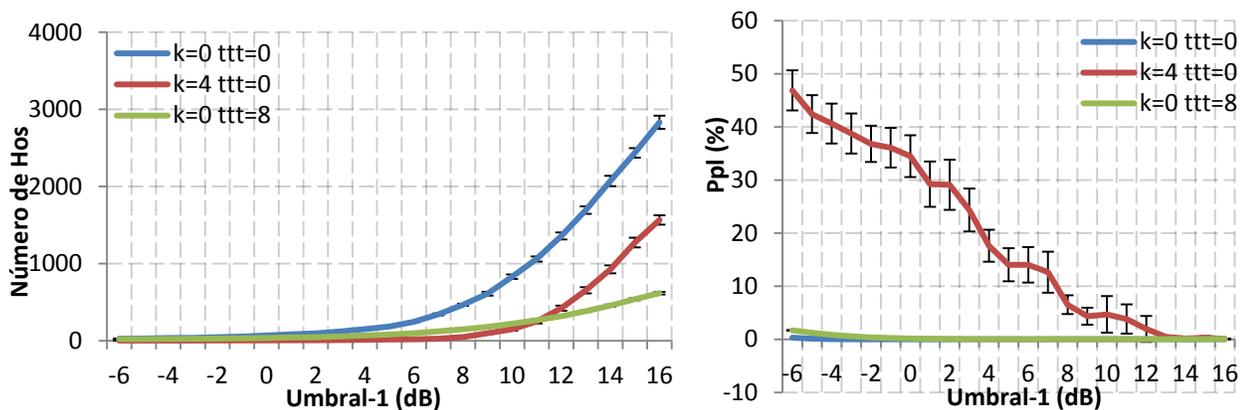
En este experimento se realizan varias simulaciones con parámetros fijos de $k=0$ y $TTT=0$, $k=4$ y $TTT=0$, $k=0$ y $TTT=8$. Se han utilizado valores de $Umbral-1=12$ y $Umbral-2=6$, con un tiempo de simulación de 30 minutos.

En la Figura 3.4(a) se muestran la cantidad de HOs como resultado de las simulaciones. Como se observó en el primer experimento para la simulación con parámetros de $k=0$ y $t_{tt}=0$ la cantidad de HO no se hace apreciable hasta niveles de $umbral-1$ iguales a 6 dB. Sin embargo al utilizar $k=4$ y $t_{tt}=0$ los HOs no se incrementan hasta un nivel de $umbral-1$ igual a 11, ocurriendo lo mismo para la simulación con $k=0$ $t_{tt}=8$.

En la Figura 3.4 (b) se muestra que para los parámetros de $k=0$ y $t_{tt}=0$ y para $k=0$ y $t_{tt}=8$ la pérdida de paquetes no es apreciable para cualquier valor del $umbral-1$. Sin embargo para la simulación con valores de $k=4$ $t_{tt}=0$ la pérdida de paquetes no mejora hasta valores de $umbral-1$ de 12 dB. Nótese que aunque en la Figura 3.4 (a) la cantidad de HOs para $k=4$ $t_{tt}=0$ son mayores que para $k=0$ $t_{tt}=8$, estos al ser determinados por el filtro, no garantizan un nivel de pérdida de paquetes que satisfaga las necesidades de los usuarios.

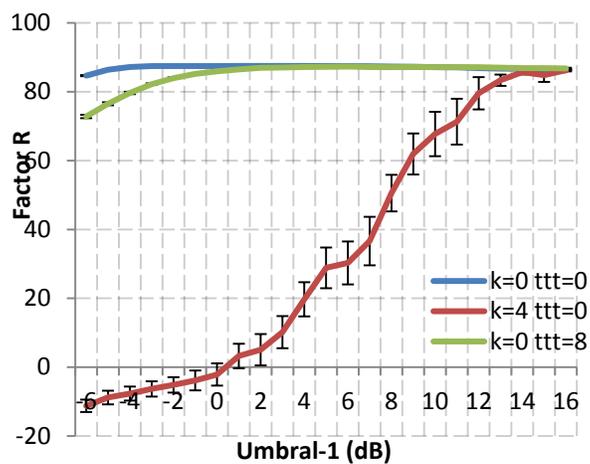
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 3.4 (c) se observa que para las simulaciones con parámetros de $k=0$ $t_{tt}=0$ y $k=0$ $t_{tt}=8$ los valores del Factor R se mantienen con un nivel aceptable. Sin embargo para $k=4$ $t_{tt}=0$ con niveles de umbral-1 de -6 a 12 el Factor R es muy bajo. A partir de niveles de umbral-1 = 12 el Factor R toma valores entre 80 y 86.



(a)

(b)



(c)

Figura 3.4 Resultados parciales del experimento 3: (a) Número de HOs; (b) probabilidad de pérdida de paquetes; (c) Factor R.

CONCLUSIONES:

Atendiendo a los resultados de los experimentos realizados que permitieron calcular en número de HO en función de un conjunto de parámetros para evento A5 se puede concluir que:

1. Los servicios de voz en LTE están basados en la conmutación de paquetes. Al utilizar estos VoIP, se hace necesario llegar a una relación de compromiso entre la pérdida de paquetes y la demora MTE para la obtener una buena calidad del servicio.
2. En LTE es utilizado solamente HO duro, este introduce un tiempo de interrupción entre el UE y la estación base, afectándose la demora y/o la pérdida de paquetes. Por lo que es necesario lograr una relación de compromiso para poder garantizar la calidad de servicio durante la conversación.
3. Existe una alta influencia entre los valores escogidos para los parámetros umbral-1, umbral-2, filtro k, TTT, velocidad y el número de HOs. De forma implícita, esto se traduce en diferentes valores de percepción de la calidad para los usuarios de servicios de voz.
4. Ha sido posible determinar, de forma experimental, los valores de parámetros individuales o parejas de parámetros para los cuales se obtienen las cantidades de HO que maximizan la calidad percibida por los usuarios de servicios telefónicos según el modelo E. Sin embargo existe una compleja interrelación entre los parámetros tratados que dificulta llegar a una función objetivo que permita la optimización de los resultados en función de los parámetros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] P. M. Avilés Delgado, “Impacto de los mecanismos de handover en la calidad percibida por usuarios de servicios de voz en LTE,” Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, 2015.
- [2] L. A. V. Soto, “Tecnología de voz sobre LTE, un paso hacia el futuro telefónico.” 2011.
- [3] E. Dahlman, “3G long-term evolution,” *Ericsson Res.*, 2005.
- [4] H. Zarrinkoub, *Understanding LTE with MATLAB: From Mathematical Modeling to Simulation and Prototyping*. John Wiley & Sons, 2014.
- [5] H. Holma, A. Toskala, and others, *Wcdma for umts*, vol. 2. Wiley Online Library, 2000.
- [6] R. Divya and A. Hüseyin, *3GPP–Long Term Evolution–A Technical Study*. Spring, 2009.
- [7] K. Meik, “LTE-Advanced technology introduction white paper,” *Rohde Schwarz Munich*, pp. 3–22, 2010.
- [8] I. Fernández López, “Planificación y dimensionado de una red LTE,” 2014.
- [9] F. Khan, *LTE for 4G mobile broadband: air interface technologies and performance*. Cambridge University Press, 2009.
- [10] R. Agusti Comes, F. Bernardo Alvarez, F. Casadevall Palacio, R. A. Ferrus Ferre, J. Perez Romero, and J. O. Sallent Roig, “LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles,” 2010.
- [11] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband*. Academic press, 2013.
- [12] M. Torabzadeh and W. Ajib, “Packet scheduling and fairness for multiuser MIMO systems,” *Veh. Technol. IEEE Trans. On*, vol. 59, no. 3, pp. 1330–1340, 2010.
- [13] Y. J. A. Zhang and S. C. Liew, “Link-adaptive largest-weighted-throughput packet scheduling for real-time traffics in wireless OFDM networks,” in *Global Telecommunications Conference, 2005. GLOBECOM'05. IEEE*, 2005, vol. 5, p. 5–pp.
- [14] J. Lee, J.-K. Han, and J. C. Zhang, “MIMO technologies in 3GPP LTE and LTE-advanced,” *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2009, no. 1, pp. 1–10, 2009.
- [15] L. Lei, Z. Zhong, C. Lin, and X. Shen, “Operator controlled device-to-device communications in LTE-advanced networks,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 19, no. 3, p. 96, 2012.
- [16] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *LTE–The UMTS Long Term Evolution*. Wiley Online Library, 2009.
- [17] 3GPP TS 23.203, “Policy and charging control architecture (Release 11).,” 2012.
- [18] S. Redana and B. Raaf, “LTE-A relaying tutorial,” in *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'11)*, 2011.
- [19] G. Yuan, X. Zhang, W. Wang, and Y. Yang, “Carrier aggregation for LTE-advanced mobile communication systems,” *IEEE Commun. Mag.*, p. 89, 2010.

- [20] A. Ghosh, R. Ratasuk, B. Mondal, N. Mangalvedhe, and T. Thomas, "LTE-advanced: next-generation wireless broadband technology [Invited Paper]," *Wirel. Commun. IEEE*, vol. 17, no. 3, pp. 10–22, 2010.
- [21] P. Rodríguez Fernández and others, "Gestión avanzada de recursos en Redes LTE: técnicas CoMP," 2015.
- [22] A. B. Varela and A. P. Verd, "LTE-Advanced," *Enginy*, vol. 3, no. 3, 2011.
- [23] Y. Nkansah-Gyekye and J. I. Agbinya, "A vertical handoff decision algorithm for next generation wireless networks," in *Broadband Communications, Information Technology & Biomedical Applications, 2008 Third International Conference on*, 2008, pp. 358–364.
- [24] A. K. Salkintzis, M. Hammer, I. Tanaka, and C. Wong, "Voice call handover mechanisms in next-generation 3GPP systems," *Commun. Mag. IEEE*, vol. 47, no. 2, pp. 46–56, 2009.
- [25] M. Poikselkä, H. Holma, J. Hongisto, J. Kallio, and A. Toskala, *Voice over LTE (VoLTE)*. John Wiley & Sons, 2012.
- [26] 3GPP TS 36.331, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA);Radio Resource Control (RRC);Protocol specification (Release 12).," 2014.
- [27] 3GPP TS 36.133, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA);Requirements for support of radio resource management (Release 12)," 2014.
- [28] L. Bononi, M. Bracuto, G. D'Angelo, and L. Donatiello, "Performance analysis of a parallel and distributed simulation framework for large scale wireless systems," in *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, 2004, pp. 52–61.
- [29] R. Shannon and J. D. Johannes, "Systems simulation: the art and science," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. SMC-6, no. 10, pp. 723–724, Oct. 1976.
- [30] C. Mehlfuhrer, M. Wrulich, J. C. Ikuno, D. Bosanska, and M. Rupp, "Simulating the long term evolution physical layer," in *Signal Processing Conference, 2009 17th European*, 2009, pp. 1471–1478.
- [31] J. C. Ikuno, M. Wrulich, and M. Rupp, "System level simulation of LTE networks," in *Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring)*, 2010 *IEEE 71st*, 2010, pp. 1–5.
- [32] G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, F. Capozzi, and P. Camarda, "Simulating LTE cellular systems: an open-source framework," *Veh. Technol. IEEE Trans. On*, vol. 60, no. 2, pp. 498–513, 2011.
- [33] 3GPP TR 36.814, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9)," 2010.
- [34] M. Series, "Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced," *Rep. ITU*, pp. 2135–1, 2009.
- [35] H.-J. Lee and J.-H. Kim, "A Handover Mechanism Considering the Abstracted R-Factor," *Veh. Technol. IEEE Trans. On*, vol. 63, no. 6, pp. 2687–2696, 2014.
- [36] C. Schindelbauer, "Mobility in wireless networks," in *SOFSEM 2006: Theory and Practice of Computer Science*, Springer, 2006, pp. 100–116.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [37] D. B. Johnson and D. A. Maltz, "Dynamic source routing in ad hoc wireless networks," in *Mobile computing*, Springer, 1996, pp. 153–181.
- [38] J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y.-C. Hu, and J. Jetcheva, "A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols," in *Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, 1998, pp. 85–97.
- [39] E. Hyytiä and J. Virtamo, "Random waypoint mobility model in cellular networks," *Wirel. Netw.*, vol. 13, no. 2, pp. 177–188, 2007.
- [40] A. M. Wyglinski, M. Nekovee, and T. Hou, *Cognitive radio communications and networks: principles and practice*. Academic Press, 2009.
- [41] 3GPP TR 25.814, "Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) (Release 7).," 2006.
- [42] B. G. Lee and S. Choi, *Broadband wireless access and local networks: mobile WiMAX and WiFi*. Artech House, 2008.
- [43] J. M. H. Rábanos, *Comunicaciones móviles*. Centro de estudios Ramón Areces, 1997.
- [44] J. B. Andersen, T. S. Rappaport, and S. Yoshida, "Propagation measurements and models for wireless communications channels," *Commun. Mag. IEEE*, vol. 33, no. 1, pp. 42–49, 1995.
- [45] D. T. Paris and F. K. Hurd, *Basic electromagnetic theory*. McGraw-Hill Companies, 1969.
- [46] M. Gudmunson, *Correlation model for shadow fading in mobile radio systems*. Electronics letters 27(23), 2145-2146, 1991.
- [47] D. Giancristofaro, "Correlation model for shadow fading in mobile radio channels," *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 11, pp. 958–959, 1996.
- [48] B. Sklar, *Digital communications*, vol. 2. Prentice Hall NJ, 2001.
- [49] I. Rec, "G. 107," *E-Model Comput. Model Use Transm. Planning* March, 2005.
- [50] R. Ramjee, J. Kurose, D. Towsley, and H. Schulzrinne, "Adaptive playout mechanisms for packetized audio applications in wide-area networks," in *INFOCOM'94. Networking for Global Communications., 13th Proceedings IEEE*, 1994, pp. 680–688.
- [51] M. Narbutt and L. Murphy, "VoIP playout buffer adjustment using adaptive estimation of network delays," *Teletraffic Sci. Eng.*, vol. 5, pp. 1171–1180, 2003.
- [52] UIT-T P.59, "Calidad de transmisión telefónica. Aparatos para mediciones objetivas. Habla conversacional artificial.," 1993.