



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

**Impacto en la percepción de calidad de los mecanismos de handover en redes LTE
con femtoceldas**

Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Telemática

Maestría en Telemática

Autor: Ing. Halder Vladimir Galdo Navarro

Tutor: MSc. Carlos Alberto Rodríguez López

Santa Clara, Cuba, 2016

RESUMEN

El número creciente de usuarios y el auge de los servicios dentro de las redes de telecomunicaciones, en especial las redes móviles han obligado a los operadores a incrementar la capacidad en dichas redes para satisfacer los nuevos requerimientos presentes y futuros. Una forma de lograrlo es el empleo de femtoceldas también llamadas HeNB (*Home eNodeB*). Las femtoceldas son pequeñas estaciones base de pequeño alcance instaladas bajo la premisa de proveer servicios en interiores tanto en ambientes empresariales como en el hogar. Sin embargo el uso de las femtoceldas genera una serie de desafíos importantes, ejemplo de ello es la gestión de movilidad, en particular el mecanismo de realización de *handover*, el cual puede afectar el desempeño de la red debido a la alta densidad y cercanía de las femtoceldas. Este trabajo tiene como objetivo analizar los mecanismos de handover en redes LTE con femtoceldas y evaluar su impacto en la calidad percibida por los usuarios QoE

Palabras Clave: LTE, Femtoceldas, *handover*

ÍNDICE

RESUMEN.....	2
ÍNDICE	3
GLOSARIO.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
Organización del informe.....	3
CAPÍTULO 1. Características de la red LTE con femtoceldas	4
1.1 Definición de femtoceldas.....	4
1.1.1 Estandarización	5
1.1.2 Escenarios de uso	5
1.2 Arquitectura de red	6
1.2.1 Arquitectura lógica.....	9
1.2.2 Modos de acceso	10
1.3 Handover.....	12
1.3.1 Tipos de handover.....	13
1.3.1.1 Handovers duros y suaves.....	13
1.3.1.2 Handover vertical y horizontal.....	14
1.3.1.3 Handover seamless y lossless.....	14
1.3.2 Tiempo de interrupción de handover	15
1.3.3 Eventos disparadores (<i>Triggers</i>).....	15
1.3.3.1 Evento A3	16
1.4 Handover en redes LTE con femtoceldas.....	18
1.4.1 Mecanismos de handover en redes LTE con femtoceldas	19
1.5 Calidad de Servicio.....	22
1.6 Consideraciones finales del capítulo.....	23
CAPÍTULO 2. DESARROLLO DEL MODELO DE SIMULACION.....	24
2.1 Escenarios de simulación	24
2.1.1 Escenario 1	24

2.1.2	Escenario 2	24
2.2	Modelo de movilidad	26
2.3	Modelo de radio propagación	27
2.3.1	Pérdidas de trayecto	27
2.3.2	Desvanecimiento por ensombrecimiento	28
2.3.3	Desvanecimiento por multi trayecto	28
2.3.4	Ruido térmico	29
2.3.5	Interferencia	29
2.4	Mecanismo de handover	30
2.5	Pérdida de paquetes	30
2.6	Demora	31
2.7	Percepción de calidad QoE	31
2.7.1	Métodos de medición intrusivos	32
2.7.2	PESQ	32
2.7.3	Métodos no intrusivos	33
2.7.4	Modelo E	34
2.8	Consideraciones finales del capítulo	35
CAPÍTULO 3. EVALUACION DE LA PERCEPCION DE CALIDAD		36
3.1	Características generales	36
3.2	Experimento 1	36
3.3	Experimento 2	39
3.4	Experimento 3	40
3.5	Resumen	42
3.6	Consideraciones finales del capítulo	44
CONCLUSIONES		45
RECOMENDACIONES		46
BIBLIOGRAFÍA		47

GLOSARIO

2G: Segunda Generación en la redes de telefonía móvil. Hace referencia al estándar GSM

3G: Tercera generación en la redes de telefonía móvil. Hace referencia al estándar UMTS

3GPP: Third Generation Partnership Project

4G: Cuarta generación en la redes de telefonía móvil. Hace referencia al estándar LTE

AP: Access Points

ARP: Allocation and Retention Priority

BS: Base Station

CSG: Close Subscriber Group

DSL: Digital Subscriber Line

EMBSD: Enhanced Modified Bark Spectral Distortion

eNB: Evolved NodeB

EPC: Evolved Packet Core

ETSI: European Telecommunication Standard Institute

E-UTRAN: Evolved-Universal Terrestrial Radio Access Network

FAP: Femto Access Point or HeNB

GBR: Guaranteed Bit Rate

GPS: Global Positioning System

GSM: Global System for Mobile Communications

GW: Gateway

HeNB GW: Home eNodeB Gateway

HeNB: Home eNB

IoT: Internet of Things

ICIC: Inter Cell Interference Coordination

IP: Internet Protocol

IPTV: IP Television

ISI: Inter Symbol Interference

LTE: Long Term Evolution

M2M: Machine to Machine

MBR: Maximum Bit Rate

MME: Mobility Management Entity

MNB: Measuring Normalizing Block

MTE: Mouth to Ear

NCL: Neighbor Cell List

PAMS: Perceptual Analysis Measurement System

PDCCP: Packet Data Convergence Protocol

PDSCH: Physical Downlink Shared Channel

PDU: Protocol Data Unit

PESQ: Perceptual Evaluation of Speech Quality

PSQM: Perceptual Speech Quality Measure

QCI: QoS Class Identifier

QoE: Quality of experience

QoS: Quality of Service

RAT: Radio Access Technology

RLC-AM: Radio Link Control Acknowledged Mode

RLC-UM: Radio Link Control-Unacknowledged Mode

RRC: Radio Resource Control

SDU: Service Data Unit

SINR: Signal to Interference plus Noise Ratio

SNR: Signal to Noise Ratio

S-GW: Serving Gateway

TCP: Transmission Control Protocol

TTT: Time to Trigger

UE: User Equipment

ITU: International Telecommunication Union

UMTS: Universal Mobile Telecommunication System

VoIP: Voice over Internet Protocol

WiMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access

INTRODUCCIÓN

La industria de las telecomunicaciones móviles comenzó su desarrollo y evolución a partir de los años 70's. Desde entonces y a lo largo de las últimas décadas las tecnologías de comunicaciones móviles han experimentado cuatro generaciones de revolución y evolución. En los últimos años estos servicios de telecomunicaciones han mostrado un desarrollo vertiginoso, dando un salto de grandes magnitudes al día de hoy, donde 6 billones de personas poseen un teléfono celular[1]. Las comunicaciones móviles forman una parte fundamental de la vida de millones de personas alrededor del mundo, situación que se espera que continúe e incluso se convierta en un hecho cada vez más innegable en el futuro. Lo que en un principio era un terminal tosco y pesado accediendo solo a un simple servicio de voz, se ha convertido en un complejo entorno de interconexión que integra a diversas tecnologías y soporta millones de aplicaciones y billones de usuarios, lo cual constituye un potencial beneficio masivo para la sociedad.

En el presente estamos viviendo la era de la cuarta generación (4G) de telefonía móvil, un estándar comercial conocido como LTE. Esta tecnología cumple una serie de requisitos, especificados en [2], entre los que destacan una velocidad pico de hasta 1000Mbps para el enlace descendente (*downlink*) y de 500 Mbps en el ascendente (*uplink*) y una latencia por debajo de 10ms, con un radio de cobertura de hasta 100 km (se aprecia una degradación del servicio a partir de los 30 Km).[3]

No obstante cada vez son mayores los retos y tendencias a los que se enfrentan las redes de telecomunicaciones en la actualidad. Entre estas podemos destacar:

1. La llamada Internet de las cosas IoT donde todos los dispositivos se conectaran a una red inalámbrica para su monitoreo, colección de información y control de dichos dispositivos. Ejemplos de estos servicios emergentes incluyen acceso remoto y monitoreo en tiempo real de una gran variedad de dispositivos que soporten servicios M2M. Se conectaran a las redes los automóviles, robots en movimiento, sensores, etc.
2. Los servicios a través de redes inalámbricas se harán cada vez más extensos y su contenido estará enriquecido y será proporcionado en tiempo real, garantizando la seguridad de los contenidos distribuidos. Ejemplo de estos servicios emergentes son el *video streaming*, *tactile Internet*, *augmented reality*, *road safety*, etc.

A partir de estas tendencias el aumento del tráfico en las redes móviles va a continuar para el futuro, proyectándose un aumento de 500 veces hasta el 2020.[4]

Para responder a estas tendencias las redes requieren de mayor grado de integración y de un aumento apreciable de la capacidad de sus recursos. Estos rasgos deben reflejarse en la arquitectura de la red con el objetivo de llegar a alcanzar el máximo potencial de las mismas.

Adicionalmente las comunicaciones necesitan ser cada vez más fiables, lo cual genera nuevos requerimientos en la latencia y la fiabilidad en la arquitectura de la red.[5]

Una manera de aumentar la capacidad del sistema de una red inalámbrica es acercar el transmisor al receptor. En una red con usuarios móviles, esto involucra un mayor despliegue de infraestructura. Una alternativa menos costosa es el reciente concepto de femtoceldas - también llamadas estaciones base para el hogar HeNB. Las femtoceldas son pequeñas estaciones base de pequeño alcance instaladas bajo la premisa de proveer servicios en interiores tanto en ambientes empresariales como en el hogar [6].

El uso de femtoceldas podría ofrecer beneficios tanto para los operadores como para los usuarios. Para los suscriptores hay una mejora en la cobertura para los servicios de voz y además se logran razones de transferencia (*data throughput*) más altas. Un mayor número de dispositivos pueden estar interconectados dentro de la red. Desde el punto de vista del operador hay una reducción en la carga de tráfico de las macro celdas, contribuyendo a reducir los costos en infraestructura. Además los problemas de cobertura en interiores podrían ser resueltos sin necesidad de agregar macro nodos en la red, y se asegura el uso de los terminales móviles dentro de los hogares, a despecho de la disponibilidad de otras tecnologías inalámbricas como *Wi-Fi*. Finalmente constituye un soporte para la transición de los servicios de red fija hacia el uso exclusivo de dispositivos inalámbricos dentro del hogar, las empresas y demás espacios interiores. [7]

Sin embargo el despliegue de femtoceldas dentro del área de cobertura de una macro celda LTE conlleva algunos desafíos importantes en varios aspectos, en especial en la gestión de movilidad, particularmente en el manejo del proceso de *handover*. El empleo de los mecanismos de *handover* en estas redes puede impactar negativamente en la percepción de la calidad percibida por los usuarios QoE debido a la densidad y cercanía de las femtoceldas así como a la movilidad de los usuarios, afectándose el desempeño de la red.[8].

La anterior situación nos conduce al siguiente problema:

¿Qué impacto tiene el empleo de los mecanismos de *handover* en redes LTE con femtoceldas en la percepción de la calidad de los usuarios?

Este problema da origen al objetivo general de este trabajo:

Evaluar el impacto en la percepción de la calidad percibida por los usuarios de los mecanismos de *handover* en redes LTE con femtoceldas.

El objeto de estudio lo constituyen los mecanismos de *handover* en redes LTE con femtoceldas y su impacto en la percepción de la calidad.

Para orientar la labor investigativa, en este trabajo se plantean como interrogantes científicas:

1. ¿Cuál es la arquitectura de la red LTE con femtoceldas?
2. ¿Cuáles son los mecanismos de *handover* en las de redes LTE?
3. ¿Cómo evaluar el impacto de los mecanismos de *handover* en la percepción de calidad de los usuarios?

Para dar respuesta a estas interrogantes nos proponemos como objetivos específicos:

1. Explicar la arquitectura de la red LTE con femtoceldas.
2. Analizar los mecanismos de *handover* en las redes LTE.
3. Evaluar, mediante simulación, el impacto en la percepción de calidad de los mecanismos de *handover* en redes LTE con femtoceldas.

Como aportes del presente trabajo se pretende obtener una caracterización las redes LTE con el uso de las femtoceldas, cuyo uso genera grandes ventajas tanto para los usuarios como para los operadores, además de posibilitar la expansión de las redes tanto desde el punto de vista de los servicios ofrecidos como de la cantidad de dispositivos que la red puede manejar. También permite un estudio de los mecanismos de *handover* y su empleo en las redes LTE con femtoceldas, totalmente necesario debido a la influencia de los mismos en la percepción de la calidad. Desde el punto de vista metodológico esta investigación sería un material de consulta acerca de la gestión de movilidad en redes LTE femtoceldas, constituyendo además un punto de apoyo para posteriores investigaciones este tema, de gran importancia y actualidad.

Organización del informe

La tesis se estructura en: introducción, capitulario, conclusiones y bibliografía. En el capítulo uno se realiza la caracterización de la red LTE con femtoceldas y se describen los mecanismos para la realización del proceso de *handover*. En el capítulo dos se define el modelo de evaluación de la percepción de la calidad, se presentan las características del modelo de simulación y se selecciona el modelo de movilidad de los usuarios. En el capítulo se evalúa el impacto de los mecanismos de *handover* en la percepción de la calidad. Se exponen los resultados de las simulaciones y se realiza la discusión de los mismos.

CAPÍTULO 1. Características de la red LTE con femtoceldas

Los recientes avances en las redes de cuarta generación 4G LTE así como el desarrollo de las redes heterogéneas han abierto las puertas al despliegue de las femtoceldas a gran escala. Este despliegue va a incrementarse significativamente debido a que las femtoceldas contribuyen a mejorar la cobertura y la capacidad del sistema. Además proporcionan un modo de operación simple tanto para entornos empresariales como para el hogar. En el presente capítulo se define la femtocelda, se analiza la arquitectura de las redes LTE con femtoceldas y se describen los mecanismos para la realización de *handover*.

1.1 Definición de femtoceldas

Los estudios llevados a cabo demuestran que más de dos tercios de la demanda del tráfico y más de un 90 % de los servicios de datos en comunicaciones móviles se originan en casa o en el trabajo. Sin embargo, más del 40 % de las casas y el 30 % de las oficinas ofrecen mala cobertura. Por lo tanto, uno de los grandes retos de los operadores móviles es proveer una buena cobertura en interiores de forma eficiente. Una de las tecnologías más prometedoras para solventar este problema son las femtoceldas.[9]

En las especificaciones de LTE, la arquitectura de femtoceldas se ha propuesto para mejorar fuertemente la calidad de servicio de la tecnología inalámbrica de última generación. Debido a las limitaciones de las macroceldas para servir a los usuarios que están geográficamente situados en lugares de mala recepción de la señal, la arquitectura de femtoceldas constituye una solución potencial para servir a una pequeña gama de puntos de acceso para interiores.[10]

Las femtoceldas LTE son también conocidas como estaciones base para el hogar HeNB y no son más que pequeñas estaciones base de muy baja potencia, en el rango de 10-100 mW, con un rango de cobertura típica en el orden de 10-30 m.[11] Con su empleo se materializa la oportunidad de habilitar aplicaciones y servicios innovadores en las redes móviles en ambientes de oficina o el hogar. Las femtoceldas son dispositivos *plug and play* que pueden ser instalados tanto por el operador como por los usuarios y conectan a los dispositivos móviles estándares a la red móvil del operador utilizando diferentes infraestructuras: tecnologías DSL, cables de banda ancha, fibra óptica o tecnologías inalámbricas de última milla.[12]

Estos dispositivos son muy similares a los puntos de acceso WiFi AP. Las diferencias más marcadas son la presencia de una ranura de tiempo para la sincronización con el servidor 1588 o la entrada de Sistema de Posicionamiento Global GPS y el amplio rango de frecuencias en que pueden operar: bandas con licencia, sin licencia y, a veces duales. Hay suficiente aleatoriedad en la planificación de las redes de femtoceldas lo cual es debido al hecho de que los HeNB son desplegados por el usuario y no por el proveedor de servicios. [13]

1.1.1 Estandarización

El mayor impacto en el proceso de estandarización de las femtoceldas lo posee el Femto Fórum, una organización sin ánimos de lucro fundada en el 2007 con el objetivo de promover y desarrollar el empleo de las tecnologías de femtoceldas en todo el mundo. Hoy cuenta con más de 70 proveedores de dicha tecnología, incluyendo operadores de servicios móviles, comercializadores de *hardware* y *software* de telecomunicaciones, proveedores de contenido, etc. El fórum ejerce una fuerte influencia sobre los cuerpos de estandarización como el ETSI y el 3GPP. Poseen una política que anima y maneja aspectos esenciales de la tecnología de femtoceldas. El trabajo de fórum se divide en dos ramas:

1. Regulación, estandarización e interoperabilidad.
2. Marketing y promoción de tecnologías.

Las redes LTE fueron definidas por el 3GPP en su especificación 8 (3GPP *release* 8) mientras que el concepto de femtocelda fue introducido en el *release* 9. La tecnología LTE se ha consolidado como la principal plataforma para los servicios móviles presentes y futuros por lo que la integración de las femtoceldas dentro de dichas redes constituye un aspecto de gran importancia y que ha sido objeto de variados y disímiles estudios.[14]

1.1.2 Escenarios de uso

El despliegue de una red de femtoceldas puede responder a diferentes necesidades, que pueden clasificarse en los siguientes casos:

1. Mejora de la cobertura en un espacio público, habitualmente en interiores, donde la señal procedente de las macroceldas no es suficiente para ofrecer un servicio adecuado. Ejemplos de este escenario son los aparcamientos subterráneos, centros comerciales, estaciones de metro o zonas rurales aisladas.
2. Mejora del servicio a una gran cantidad de usuarios ubicados en un espacio público de dimensiones reducidas. La instalación de femtoceldas dentro del área de servicio de una macrocelda puede servir para reducir el tráfico localizado en algún área dentro de la misma. De esta manera, las femtoceldas son una solución sencilla y económica para el alivio de problemas de congestión en las macroceldas. Ejemplos de este escenario son los estadios deportivos, grandes edificios o centros universitarios.
3. Mejora del servicio ofrecido a un subconjunto de usuarios identificado previamente instalando una femtocelda en un espacio privado interior. En este caso, la femtocelda suele tener un modo de acceso cerrado o híbrido, donde el usuario propietario accede a los recursos de la femtocelda sin competir por ellos con el resto de usuarios de las macroceldas. Algunos ejemplos de este escenario son viviendas residenciales, oficinas o restaurantes.

El despliegue de una red de femtoceldas no siempre se debe a una sola de estas razones, respondiendo en la mayoría de las ocasiones a varias de ellas al mismo tiempo.[9]

1.2 Arquitectura de red

La conexión de femtoceldas a las redes de operadores existentes requiere una arquitectura de red que responda a las necesidades de seguridad de los operadores y los usuarios móviles, además de soportar el despliegue escalable de millones de femtoceldas. También debe permitir a los consumidores habituales una sencilla instalación *plug-and-play* y asegurar que los servicios críticos tales como llamadas de emergencia sean compatibles con la misma fiabilidad y precisión de una línea fija[15].

La arquitectura de red de femtoceldas debe soportar los siguientes requisitos:

1. Paridad de servicios: Las femtoceldas deben soportar los mismos servicios de voz y datos de banda ancha que los usuarios móviles están recibiendo actualmente en la red de macroceldas. Esto incluye los servicios de conmutación de circuitos, tales como mensajes de texto y diferentes servicios de voz característicos, tales como el desvío de llamadas, identificador de llamadas, correo de voz y llamadas de emergencia.
2. Continuidad de la llamada: Las femtoceldas deben estar bien integradas a la red de macroceldas de forma tal que una llamada originada tanto en una femtocelda o en una macrocelda tenga continuidad cuando el usuario se mueva hacia dentro a hacia afuera de un área de cobertura de femtocelda. La arquitectura de femtocelda debe soportar los mecanismos necesarios para asegurar esta continuidad.
3. Seguridad: Las femtoceldas deben soportar los mismos mecanismos de seguridad en la interfaz aire que las macroceldas. Además debe poseer capacidades de protegerse de las amenazas provenientes de la Internet. La arquitectura de femtocelda debe proveer seguridad en el acceso a la red, e incluir mecanismos de autenticación que proteja a los usuarios de cualquier tipo de fraude.
4. Auto-configuración & Operación y administración simple: Las femtoceldas son instaladas por el usuario final, por tanto la arquitectura debe soportar un simple proceso de instalación con configuración y administración automática[7].
5. Escalabilidad: La red de femtocelda puede tener millones de puntos de acceso por lo que la arquitectura debe soportar el crecimiento sostenido de la red manteniendo la fiabilidad y manejabilidad.

La estandarización de la arquitectura de femtoceldas es dirigida por el Femto Fórum y el 3GPP. Si bien la arquitectura no está del todo finalizada existe un fuerte consenso de mantenerla lo más plana posible, siguiendo los principios de una red *“all-IP”* presente en el estándar LTE. El debate aun continua en si es necesario o no agregar en la arquitectura un elemento para manejar señalización de las femtoceldas o si el propio núcleo de la red EPC debería tener capacidad de soportar las femtoceldas directamente.[8]

La arquitectura general de una red LTE con femtoceldas incluyendo la pasarela de señalización HeNB GW se muestra en la figura 1.1.

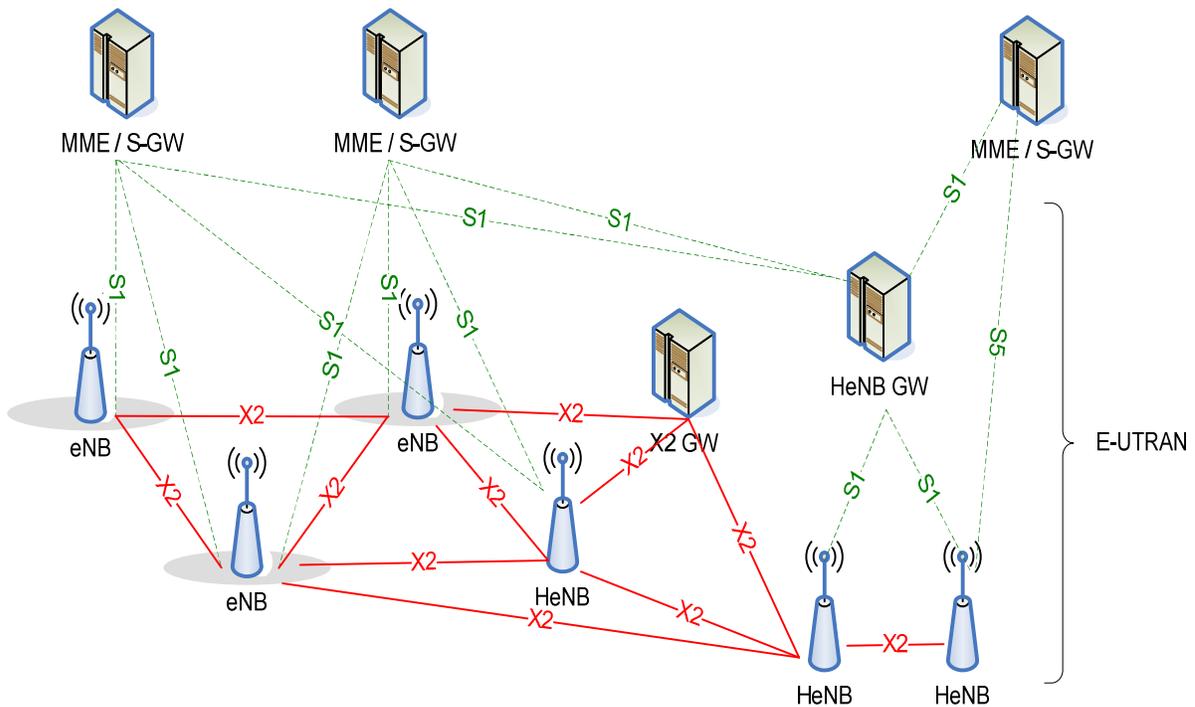


Figura 1.1: Arquitectura general de una red LTE con femtoceldas. [16]

La arquitectura del sistema E-UTRAN está formada por los siguientes elementos:

1. eNB: constituye la macrocelda o estación base de la red LTE y soporta las siguientes funcionalidades:
 - a. Funciones para la gestión de recursos de radio
 - b. Compresión de la cabecera IP y cifrado del flujo de datos de usuario
 - c. Enrutamiento de los datos del plano de usuario hacia la pasarela de servicio S-GW
 - d. Programación y transmisión de mensajes de búsqueda (*paging*)
 - e. Programación y transmisión de mensajes de difusión (*broadcast*)
 - f. Configuración de mediciones y mediciones para la movilidad y programación
 - g. Marcado de paquetes en el nivel de transporte en el enlace ascendente (*uplink*)
 - h. Manejo de los grupos cerrados de usuarios CSG

2. MME: entidad para el manejo de la movilidad. Debe soportar las siguientes funcionalidades:
 - a. Manejo de señalización.
 - b. Seguridad de la señalización.
 - c. Señalización inter núcleos de red para soportar la movilidad.
 - d. Selección de la pasarela de servicio.
 - e. Selección de la pasarela de señalización para el *handover* hacia redes GSM/UMTS (2G/3G).
 - f. Itinerancia o *roaming*.
 - g. Autenticación.
 - h. Funciones de administración de portadoras incluyendo el establecimiento de portadoras dedicadas.
3. S-GW: pasarela de servicio. Soporta las siguientes funciones.
 - a. Ruteo y envío/reenvío de paquetes de datos.
 - b. Marcado de paquetes en el nivel de transporte en el enlace ascendente (*uplink*) y en enlace descendente (*downlink*)
 - c. Contabilidad de la granularidad del identificador de clase de servicio de los usuarios para el cobro inter-operadores.
 - d. Servicios de localización con fines legales.
 - e. Cobro del tráfico de datos para los enlaces ascendente y descendente.
4. HeNB: constituye la femtocelda y debe soportar las mismas funcionalidades que la macrocelda eNB con las siguientes especificaciones adicionales en caso de que exista presencia de la pasarela de señalización para femtoceldas HeNB GW:
 - a. Descubrimiento de una pasarela de señalización conveniente.
 - b. La femtocelda solo puede estar conectada a una pasarela de señalización a la vez.
 - c. La selección del MME es función de la pasarela de señalización y no de la femtocelda.
 - d. Las femtoceldas deben soportar un despliegue sin necesidad de hacer una planificación en la red.

5. HeNB GW: pasarela de señalización para las femtoceldas. Sirve de concentrador de la señalización de las femtoceldas conectadas a ella. Su presencia en la arquitectura es opcional. Alberga las siguientes funcionalidades:
 - a. Relevos de los mensajes de aplicación entre el MME en servicio y el HeNB en servicio.
 - b. Terminación del procedimiento asociado a la interfaz S1 hacia el MME y hacia el HeNB.
 - c. Terminación de la interfaz de usuario S1-U con el HeNB y el S-GW.
 - d. No soporta la interfaz X2.
 - e. Selección de la versión del protocolo IP para la interfaz S1-U.
 - f. El empleo de HeNB GW es equivalente a expandir la interfaz S1 entre la femtoceldas y el núcleo de la red lo que posibilita que un número mayor de femtoceldas puedan ser desplegadas.

6. X2 GW: Pasarela de señalización X2. Soporta las siguientes funcionalidades:
 - a. Ruteo de la interfaz X2 hacia el eNB o HeNB de destino de acuerdo a la información recibida del núcleo de la red[16].

1.2.1 Arquitectura lógica

Para lograr una mejor integración de las femtoceldas dentro de la red LTE la pasarela de señalización HeNB GW debe parecer como una macrocelda eNB para el MME, y para la femtocelda debe parecer como un MME entre la misma y el núcleo de la red ya que normalmente existen cientos de femtoceldas desplegadas en la red LTE tradicional. Además la pasarela de señalización debe tener conexión con la plataforma de operación y mantenimiento de la red para operaciones de configuración y control.[8]

En la figura 1.2 se muestra la estructura lógica de la red. El 3GPP especifica dos interfaces S1 y X2 para el núcleo de la red EPC. La interfaz X2 provee la funcionalidad para soportar la movilidad y el intercambio de información entre las macroceldas eNB. La interfaz S1 soporta la relación entre el MME/S-GW y el eNB. Adicionalmente es usada también para la comunicación entre la femtocelda y el MME/S-GW.[17]

Se observa que el HeNB GW, en caso de existir, sirve de concentrador para el plano de control, es decir para la interfaz entre el HeNB y el MME (S1-MME). En el plano de usuario, la conexión entre el HeNB GW y el S-GW se lleva a cabo a través de la interfaz S1-U que puede ser entre el HeNB y el HeNB GW, si este último existe, o terminar directamente en el S-GW.[9]

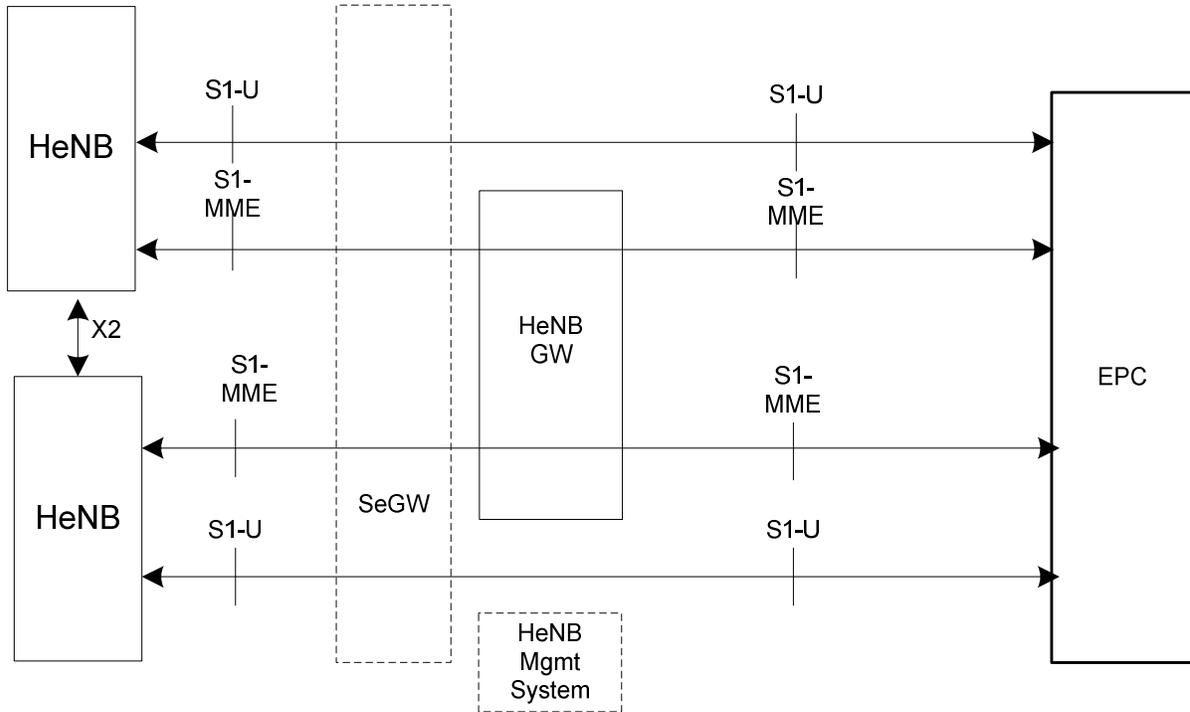


Figura 1.2: Arquitectura lógica de la red.[16]

1.2.2 Modos de acceso

Las femtoceldas pueden disponer de una lista de suscripción de usuarios, que pueden utilizarse para limitar el acceso a las mismas. Existen tres métodos de control de acceso, que determinan cuándo se permite o se bloquea a un determinado usuario:

1. Acceso abierto: el acceso abierto se corresponde con el funcionamiento típico de una macrocelda, donde cualquier usuario puede conectarse a la femtocelda. Este tipo de acceso es apropiado para centros comerciales, aeropuertos, restaurantes y lugares públicos similares, donde se pretende dar cobertura al público en general en un entorno de interiores.
2. Acceso cerrado. En el método de acceso cerrado, los servicios que ofrece la femtocelda solo están disponibles para un conjunto limitado de usuarios (es decir, usuarios pertenecientes al CSG). Este conjunto de usuarios se define por el propietario de la femtocelda que, normalmente, es de uso privado. Este tipo de acceso está concebido principalmente para uso doméstico.
3. Acceso híbrido. El método de acceso híbrido representa un caso intermedio entre los dos anteriores. Con este tipo de acceso, se pretende mejorar las prestaciones de la red que ofrecen tanto el acceso abierto como el acceso cerrado. En el modo de acceso híbrido, se define también un grupo restringido de usuarios CSG, que acceden de forma prioritaria a los recursos de la

femtocelda. Sin embargo, usuarios que no pertenecen al CSG tiene permitido el acceso solo a una parte reducida de los recursos. Con ello, se pretende paliar los problemas de interferencia generados por el esquema de acceso cerrado.[18]

En la Figura 1.3 se muestra un ejemplo de funcionamiento de los tres tipos de control de acceso.

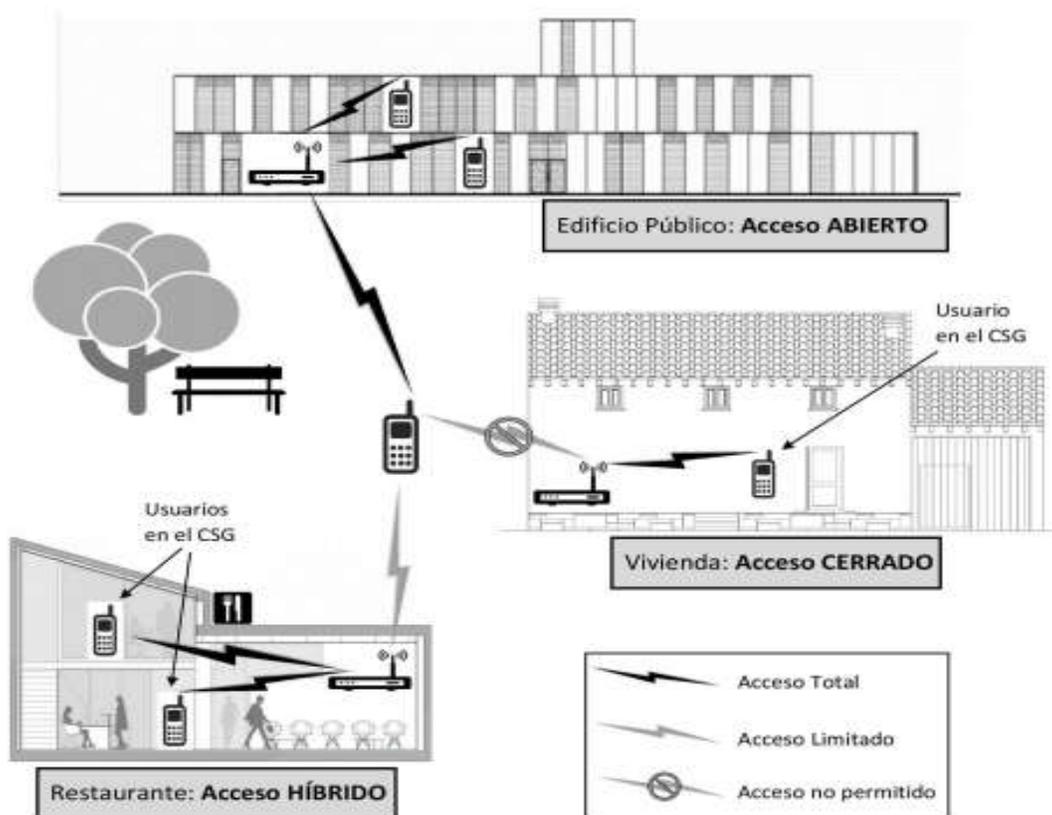


Figura 1.3 Esquemas de acceso a una red con femtoceldas.[9]

Como puede verse, los usuarios que pertenecen al CSG pueden acceder a los recursos de todas las femtoceldas. Por el contrario, los usuarios que no pertenecen al CSG tienen acceso total a los recursos de las femtoceldas de acceso abierto, limitado cuando su acceso es híbrido y sin acceso a los recursos de la femtocelda de acceso cerrado. Cuando el modo de acceso es abierto, los usuarios de las macroceldas que se encuentran en interiores pueden conectarse a las femtoceldas, liberando espacio de la macrocelda y mejorando la calidad de conexión. Por lo tanto, desde el punto de vista del operador móvil, el modo de acceso abierto es el óptimo, ya que maximiza la capacidad de la red y mejora la calidad de las conexiones de los usuarios de las macroceldas. No obstante, cuando usuarios de la macrocelda se conectan a

una femtocelda, hacen uso de los recursos de esta, por lo que los usuarios propietarios de la misma pueden percibir un deterioro de su calidad de experiencia. En consecuencia, desde el punto de vista del usuario propietario de la femtocelda, el modo de acceso cerrado es el que optimiza su calidad de experiencia. El modo de acceso híbrido permite un compromiso entre ambas partes, sin deteriorar en exceso el servicio ofrecido al usuario propietario de la femtocelda.

1.3 Handover

El propósito principal de *handover* en las redes móviles es o bien garantizar una conexión continua con alta calidad de servicio QoS o balancear la carga en la red. A fin de determinar el instante de tiempo óptimo para llevar a cabo el *handover*, las condiciones del canal tienen que monitorearse de forma continua por las estaciones móviles UE. Esta etapa del *handover* se conoce como escaneo de celdas vecinas. Los UE escanean todas las celdas incluidas en su lista de celdas vecinas NCL. Los resultados de medición se informan al núcleo de la red. La notificación puede realizarse periódicamente o puede activarse con un evento disparador. Los resultados obtenidos por la medición son procesados por la estación base y se utilizan para la decisión de *handover* y su inicio.

En este paso, se selecciona la posible estación base de destino en función de los parámetros del canal y de calidad de servicio que ofrece. En el caso más simple, las muestras de los niveles de señal recibidos de las estaciones vecinas se comparan y el procedimiento de *handover* se inicia si el nivel de la celda vecina supera al nivel de señal de la celda en servicio más un umbral.[19]

Además de la histéresis, existe un parámetro llamado tiempo de disparo TTT (*Time to Trigger*) que debe ser considerado en el procedimiento de *handover*. Este parámetro representa el tiempo entre el cumplimiento de la condición de *handover* y el inicio del mecanismo. Con su empleo se reducen los *handovers* redundantes debido a los efectos del desvanecimiento rápido o el efecto *ping-pong* (traspasos continuos entre dos celdas adyacentes).

Mientras se inicia el *handover*, el equipo de usuario se sincroniza con un canal de enlace descendente de la estación base de destino. Antes de que se complete la sincronización, la conexión con la estación base de servicio tiene que ser terminada. Mientras tanto, el UE no puede recibir ni transmitir datos de usuario. Tan pronto como se haya completado la sincronización con el enlace descendente de la estación base de destino, el UE inicia la siguiente etapa de *handover*: procedimiento de re-entrada a la red. Durante esta etapa el UE realiza también una re-autorización y un re-registro. El UE obtiene información del canal de subida y sus parámetros como potencia de transmisión, sincronización y frecuencia. Después de una autorización y registro exitosos el UE continúa su operación normal y los datos de usuario se vuelven a intercambiar. En la figura 1.4 se muestra el mecanismo de *handover* convencional.

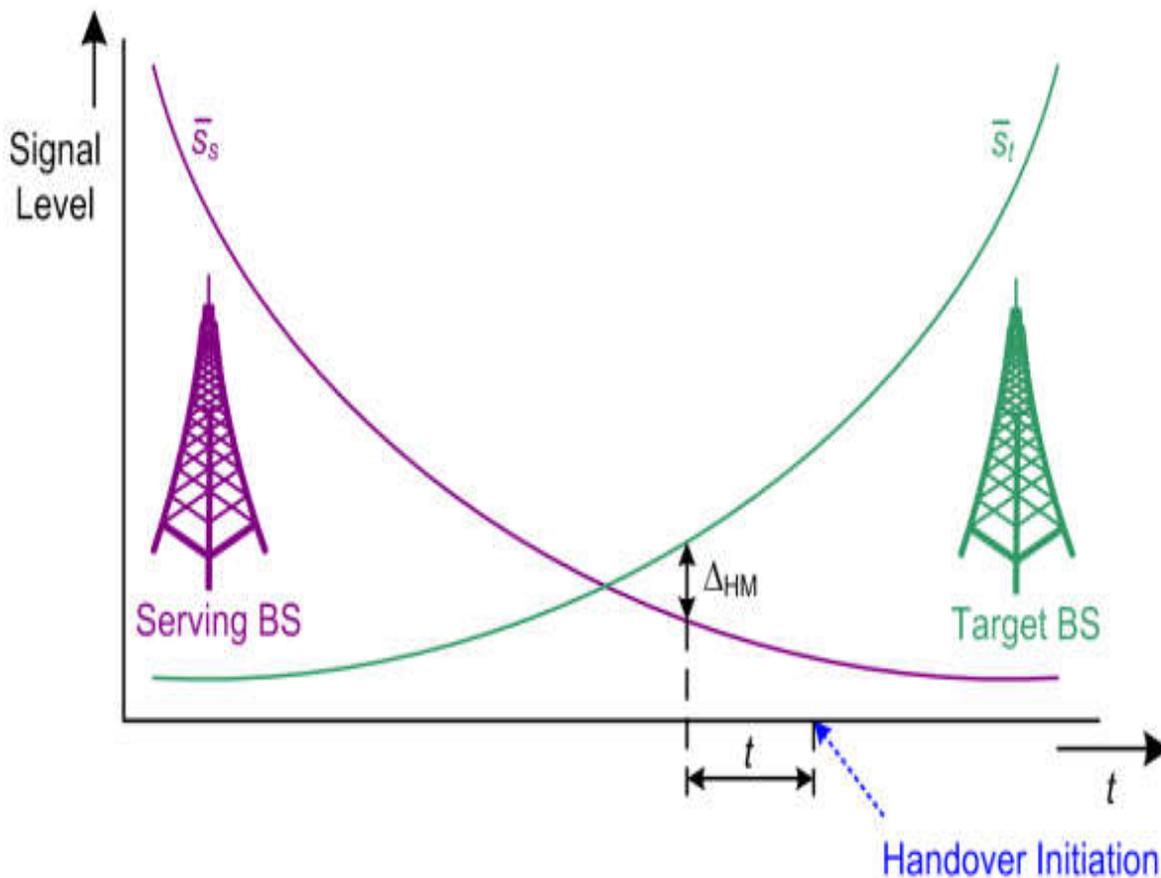


Figura 1.4 Decisión convencional de handover.[19]

1.3.1 Tipos de handover

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

1.3.1.1 Handovers duros y suaves

Existen dos tipos de *handover* teniendo en cuenta si se interrumpe o no la conexión del UE con la red durante un corto periodo de tiempo: *hard handover* o *handover* duro (conocido como *break before make*) y *soft handover* o *handover* suave (conocido como *make before break*). El *handover* duro requiere que el UE interrumpa momentáneamente la conexión con la BS en servicio para poder conectarse con la estación base objetivo, debido a que puede estar conectado solo con una estación base a la vez. El uso de este tipo de *handover* reduce la complejidad del proceso de *handover* y minimiza la demora del mismo, pero introduce un tiempo de interrupción en la comunicación entre el UE y el eNB.

Por otra parte, en el mecanismo de *handover* 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 *handover* requiere de funcionalidades extras en el UE para mantener más de una conexión, y también necesita un mayor número de procedimientos de señalización. En LTE solo se utiliza el *handover* duro.[20]

1.3.1.2 Handover vertical y horizontal

El *handover* también se puede clasificar en otras dos categorías: *handover* vertical y *handover* horizontal. Los *handovers* verticales son aquellos en los que intervienen diferentes tecnologías de acceso de radio. Pueden ser realizados dentro de la misma familia de tecnologías, por ejemplo de 4G LTE a 3G UMTS o de 4G LTE a 2G GSM o puede involucrar diferentes familias de tecnologías, por ejemplo de LTE a WiMAX. Por otra parte, el *handover* horizontal se refiere a aquel que se realiza dentro de la misma tecnología de red.[21]

En este aspecto, el 3GPP define el *handover* intra-LTE y el inter-RAT, siendo el primer tipo aquel en el que tanto la BS en servicio como la estación base objetivo pertenecen a LTE, y el segundo tipo aquel en el que una de las dos estación base pertenece a LTE y la otra pertenece a una tecnología de acceso de radio RAT que no es LTE. Además, el *handover* 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 *handover* basado en X2 o *handover* basado en S1 dependiendo de la interfaz que es utilizada para el intercambio de los mensajes de señalización durante la fase de preparación de *handover*. En el *handover* basado en X2 los mensajes de señalización son intercambiados directamente entre los dos eNB sin la intervención de la MME. El *handover* basado en X2 es menos complejo y está optimizado para tráfico en tiempo real, mientras que el *handover* basado en S1 es necesario cuando la interfaz X2 no puede ser usada (o no existe) o cuando debe cambiarse la MME. [22]

1.3.1.3 Handover seamless y lossless

El objetivo del *handover 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 *handover* 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 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 *handover seamless* minimiza la complejidad y la demora a pesar de pueden perderse algunas unidades de datos de servicio SDUs. [23]

Por otro lado, el *handover lossless* implica que no se pierdan datos durante el proceso de *handover*. Esto se logra mediante la retransmisión de las unidades de datos de protocolo PDUs del protocolo de convergencia de datos de paquetes PDCP que no hayan sido reconocidos por el UE antes que el UE abandone la estación base en servicio para hacer el *handover*. La entrega en secuencia durante el *handover* puede ser garantizada usando los números de

secuencia de PDUs de PDCP. Este tipo de *handover* 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 del protocolo de control de transmisión TCP. El *handover 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 RLC-AM.

1.3.2 Tiempo de interrupción de handover

En el *handover* intra-LTE el tiempo de interrupción de *handover* se define como el tiempo entre el final del último intervalo de tiempo de transmisión TTI que contiene el comando de control de recursos de radio RRC, usado para ejecutar el *handover*, en el antiguo canal físico compartido del enlace descendente PDSCH y el momento en el que el UE inicia la transmisión del nuevo canal físico de acceso aleatorio PRACH sin incluir la demora de procedimiento RRC.

El tiempo de interrupción de *handover* depende de las demoras de acceso inicial y asignación de ancho de banda después de la decisión de *handover*. La variación de la demora de acceso inicial puede ser compensada mediante el ajuste de potencia [24] y los mecanismos de negociación del tiempo de *handover* [25]. La demora de asignación de ancho de banda puede ser reducida si se usa la oportunidad de acceso pre asignado y se realiza la reserva de recursos antes de la ejecución del HO. Ambos mecanismos son usados actualmente en las redes LTE.

Cuando se recibe un comando de *handover*, el tiempo de interrupción debe ser menor que T_{int} calculado en (1.1):

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

Donde:

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 *handover*. [26]

1.3.3 Eventos disparadores (*Triggers*)

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 1.1 se muestran los eventos definidos para LTE.

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 *handover*. El presente trabajo se centra en el evento A3.

1.3.3.1 Evento A3

El evento A3 compara la señal de la celda vecina con la señal de la celda en servicio teniendo en cuenta varios parámetros adicionales: histéresis Hys, offset específico de celda O_c , offset específico de frecuencia O_f , Offset. 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 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]

Si el evento es disparado inmediatamente luego que su condición de entrada se cumple, entonces el *handover* 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 la razón de transferencia (*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 tardaría más tiempo en realizar el *handover*, 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. En la Figura 1.5 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.

Tabla 1.1 Eventos disparadores en LTE [26]

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

La condición escogida para la decisión de *handover* puede ser filtrada en la capa 3 usando la ecuación 1.2 antes de ser usado para la evaluación de las condiciones que disparan el evento. 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.

$$Fi = (1 - a)Fi_{-1} + aMi \quad (1.2)$$

Donde:

Mi : Último resultado de medición recibido de la capa física;

Fi : Resultado de medición filtrado (actualizado), usado para la evaluación;

Fi_{-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]

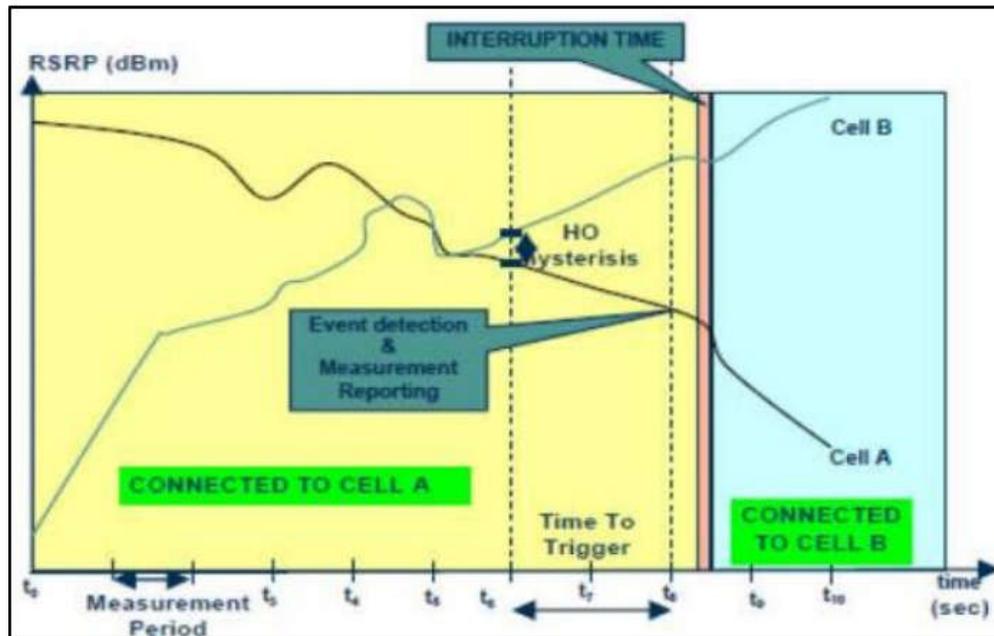


Figura 1.5 Evento A3. [27]

1.4 Handover en redes LTE con femtoceldas

Los usuarios que se conectan a una femtocelda deben hacerlo sin interrumpir su conexión, de lo que se encargan los mecanismos de *handover*. Estos procesos deben garantizar que el traspaso en femtoceldas se realiza de la misma forma que en macroceldas, a pesar de que el canal de retorno de las femtoceldas es distinto. Según el origen y el destino del usuario, existen tres tipos de traspaso en femtoceldas, que son:

1. Traspaso desde una macrocelda hacia una femtocelda. Este tipo de traspaso ocurre cuando el usuario pasa de exterior a interior, situación que ocurre con asiduidad. La principal dificultad radica en que la macrocelda y la femtocelda usan canales de retorno distintos. Debido a esto, el proceso de traspaso en este caso se realiza siempre a través de la red troncal. La femtocelda debe estar identificada con un identificador único, como cualquier macrocelda, y debe estar incluida en la lista de vecinas de la macrocelda. Además, se debe comprobar si la femtocelda es de acceso abierto o híbrido, en cuyo caso el traspaso podría realizarse, o de acceso cerrado, en cuyo caso el traspaso solo podría llevarse a cabo si el usuario pertenece al CSG de la femtocelda destino.
2. Traspaso desde una femtocelda a otra femtocelda. Este tipo de traspaso se suele dar en redes de femtoceldas, siendo el caso más sencillo. Si ambas

femtoceldas se conectan al mismo HeNB GW, el traspaso se realiza a través del mismo sin necesidad de llegar a la red troncal. Si este no es el caso, el traspaso debe realizarse, al igual que en el caso anterior, a través de la red troncal. Además, si ambas femtoceldas son de distintos propietarios y su acceso no es abierto, es necesario comprobar si el usuario pertenece al CSG de la femtocelda destino.

3. Traspaso desde una femtocelda hacia una macrocelda. Este tipo de traspaso ocurre cuando el usuario pasa de interior a exterior. A diferencia del traspaso desde una macrocelda a una femtocelda, no es necesario comprobar el modo de acceso, ya que el traspaso es hacia la macrocelda, donde el acceso es abierto a todos los usuarios. Al igual que en el primer tipo de traspaso, el proceso de señalización debe realizarse a través de la red troncal.[28]

En la figura 1.6 se muestra un resumen de estos escenarios.

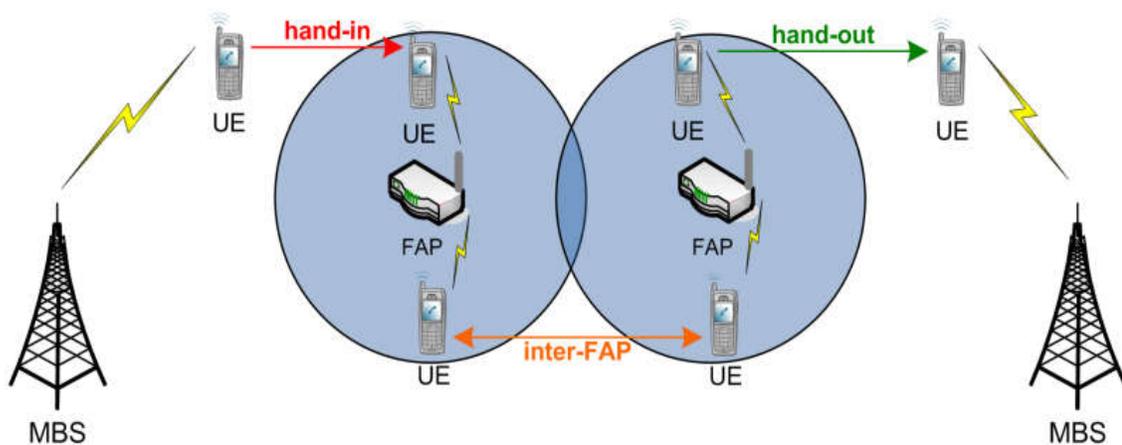


Figura 1.6 Escenarios de handover en redes LTE con femtoceldas.[19]

1.4.1 Mecanismos de handover en redes LTE con femtoceldas

Los criterios para efectuar el *handover* en redes LTE con femtoceldas son diferentes a los criterios convencionales, debido a que no existe siempre la interfaz directa X2 entre los HeNB como existe entre los eNB. Es por ello que los parámetros a tener en cuenta para la evaluación y el desenvolvimiento del mecanismo de *handover* deben ser cuidadosamente seleccionados.

1. Algoritmos basados en nivel de señal recibida. (*Received Signal Strength*) Los algoritmos basados en el nivel de señal recibida son aplicados en la redes convencionales pero en presencia de femtoceldas debido a su alta densidad y su baja potencia de transmisión podemos llegar a un escenario donde la probabilidad de handover sea muy alta incluso llegando a producirse el efecto ping-pong donde un mismo usuario salte entre dos celdas repetidamente, con la consiguiente degradación del servicio. Si se pretende aplicar estos mecanismos en redes con femtoceldas, se debe escoger valores apropiados de margen

de histéresis a la hora de comparar el nivel de señal de la celda origen y las celdas destino, para disminuir la probabilidad de *handover* y así prevenir el efecto *ping-pong*, como se muestra en la figura 1.7. [11]

2. Algoritmos basados en la velocidad. El criterio principal para a decisión de *handover* en estos algoritmos es la velocidad de los usuarios. Debido al área pequeña de cobertura de las femtoceldas los usuarios a altas velocidades pueden cruzarlas en un tiempo muy corto por lo que es muy probable que no necesiten realizar *handover* sobre todo si se encuentran ejecutando un servicio que no sea de tiempo real (*non real time*). En general la movilidad de los usuarios puede ser clasificada de la siguiente manera:
 - a. Movilidad baja: desde 0 hasta 15 Km/h, usuarios caminando o estacionarios.
 - b. Movilidad media: desde 15 hasta 30 Km/h. usuarios en bicicleta.
 - c. Movilidad alta: mayor de 30 Km/h, usuarios desplazándose en vehículos.

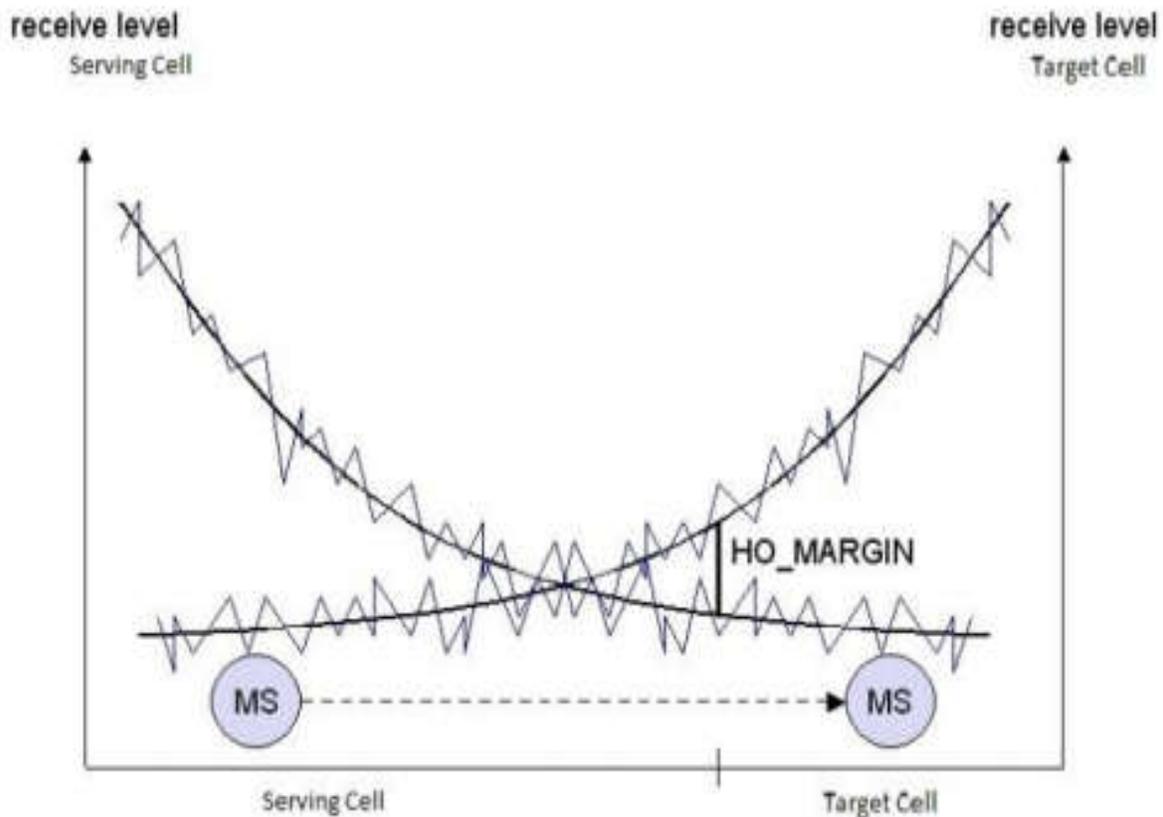


Figura 1.7 Algoritmo basado en el nivel de señal. [11]

La calidad de servicio (QoS) juega un papel fundamental en estos tipos de algoritmos. Para aplicaciones que no se ejecuten en tiempo real el retardo excesivo y la alta probabilidad de pérdida de paquetes que trae consigo un exceso de *handover* innecesarios puede ser tolerada, sin embargo para servicios en tiempo real como voz sobre IP (VoIP), IPTV y

juegos en línea (*online games*) la calidad de servicio puede verse seriamente afectada es por eso que ambos criterios deben ser tenidos en cuenta al mismo tiempo[8]. En la figura 1.8 se muestra un ejemplo de algoritmo basado en la velocidad.

3. Algoritmos basados en la coordinación de interferencia. Las técnicas de coordinación de interferencia inter-celdas ICIC pueden resultar muy útiles en la optimización del proceso de handover sobre todo en los casos donde la densidad de femtoceldas es muy alta. Cuando el handover ocurre entre celdas que se solapan el nivel de interferencia puede aumentar provocando una degradación en la calidad del servicio. Los algoritmos basados en la coordinación de interferencias se basan en dividir las bandas de frecuencia disponibles en sub-bandas más pequeñas como se muestra en la figura 1.9. Luego cada celda escoge una sub-banda para transmitir de manera autónoma y de esta manera el nivel de interferencia sobre las celdas vecinas se reduce a un nivel mínimo.[29]

```

1.  INITIALIZATION
2.  Calculate V
3.  IF V>30kmph
        NO handover
4.  ELSE IF V>15kmph
        IF REAL-TIME
            NEED handover
        ELSE IF NON-REAL-TIME
            NO handover
5.  ELSE
        NEED handover
RETURN

```

Figura1.8 Algoritmo de handover basado en velocidad.[8]

4. Algoritmos basados en la restricción del acceso. Una manera de combatir el exceso de handover y sus consecuencias indeseadas dentro de las redes LTE con femtoceldas puede ser manejando la restricción de acceso a algunas femtoceldas en particular, ya sea porque la misma se encuentra congestionada, o alguno de sus parámetros se encuentra afectado etc. La restricción del acceso se logra a partir del establecimiento de grupos cerrados de usuarios CSG. En el modo CSG solo pueden acceder a una celda los usuarios que estén autorizados a ello. El HeNB de destino se selecciona a partir de asignar prioridad a los posibles destinos y escoger aquel de prioridad más alta. En caso de que este no posea recursos disponibles el siguiente destino de más prioridad pasa a ser

considerado. Este tipo de mecanismos puede también emplearse combinado con alguno de los anteriores lo cual permite enfrentar escenarios donde existen varios HeNB disponibles como destino con la misma prioridad. En este caso otros factores como el nivel de señal recibido o la calidad de la misma pueden usarse como criterio para la selección del destino.[28]

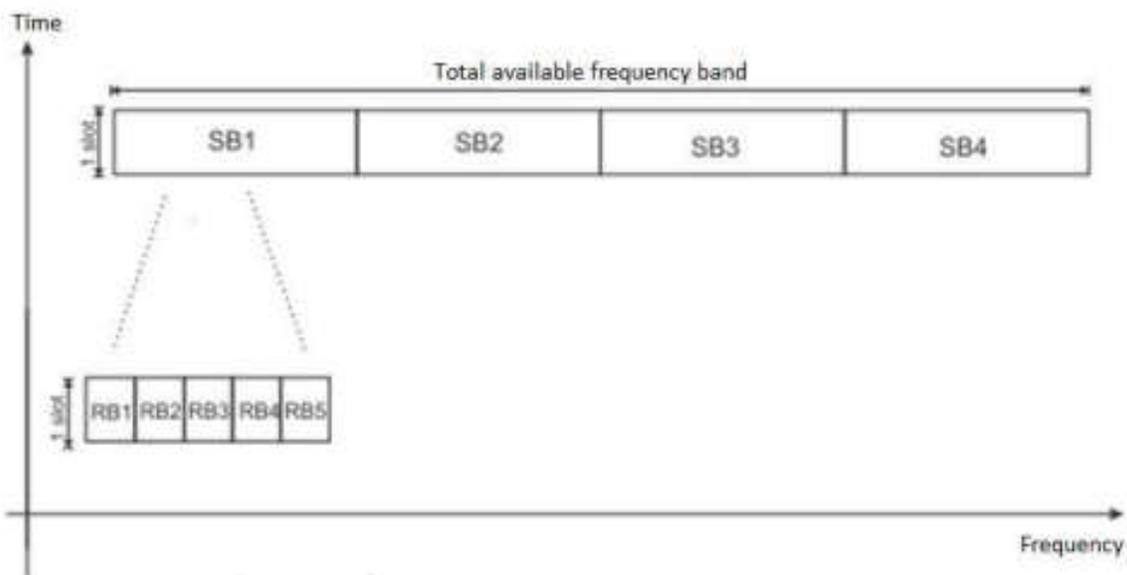


Figura 1.9 Esquema de partición de frecuencias.[29]

1.5 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 voz sobre IP 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 GBR o del tipo Razón de Bit No Garantizada Non-GBR.

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 MBR, que puede también estar asociado a una portadora GBR, establece un límite superior en la razón de bit que puede esperarse. La portadora Non-GBR 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.[23]

En la red de acceso, es responsabilidad del eNB o el HeNB asegurar la QoS necesaria para una portadora sobre la interfaz de radio. Cada portadora tiene asociado un Identificador de Clase de Calidad de Servicio QCI y una Prioridad de Retención de Asignación 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 1–2.

Tabla 1–2: QCIs estandarizados en LTE[30]

QCI	Tipo de Recurso	Prioridad	Demora	Razón de pérdidas de paquetes	Servicios
1	GBR	2	100ms	10^{-2}	Llamadas de voz
2	GBR	4	150ms	10^{-3}	Video-llamadas
3	GBR	3	50ms	10^{-3}	Juego en tiempo real
4	GBR	5	300ms	10^{-6}	Video bajo demanda
5	NGBR	1	100ms	10^{-6}	Señalización IMS
6	NGBR	6	300ms	10^{-6}	Video bajo demanda
7	NGBR	7	100ms	10^{-3}	Voz y video en vivo, juegos interactivos
8	NGBR	8	300ms	10^{-6}	Servicios basados en TCP (correo, chat, <i>www</i>)
9	NGBR	9	300ms	10^{-6}	Servicios basados en TCP (correo, chat, <i>www</i>)

1.6 Consideraciones finales del capítulo

Las redes LTE constituyen la tecnología imperante en el mundo de las telecomunicaciones móviles de hoy. Estas tecnologías utilizan la conmutación de paquetes en lugar de la conmutación de circuitos, e incorporan una serie de aspectos y características novedosas orientadas a mejorar el desempeño de la red. Una de estas características es la agregación de las femtoceldas, que contribuyen a mejorar la cobertura y garantizar el servicio con mayor calidad en espacios interiores. No obstante existen elementos a tener en cuenta a la hora del empleo de estas femtoceldas. Ejemplo de ello es la movilidad, debido a que los mecanismos de handover convencionales podrían conducir a situaciones donde la calidad del servicio podría verse afectada.

CAPÍTULO 2. DESARROLLO DEL MODELO DE SIMULACION

Este capítulo 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. Se expone el modo en que se modelan la pérdida de paquetes y la demora de extremo a extremo. Además se mencionan los modelos posibles a utilizar para la evaluar la percepción de calidad QoE haciéndose énfasis en el modelo E y se desarrolla un modelo de simulación basado en Matlab que permita evaluar los mecanismos de *handover* en cuanto a la QoE.

2.1 Escenarios de simulación

Los entornos de simulación están basado en las recomendaciones de la ITU para la evaluación de las RAT para el IMT-*Advanced*, usados también en [31]. En (Series, 2009) se definen varios entornos de prueba con el objetivo de especificar las características comunes para la evaluación de las RAT para IMT *Advanced*. Los entornos de prueba propuestos son *Indoor*, *Microcellular*, *Base Coverage Urban* y *High Speed*, cumpliendo con la recomendación. [32].

2.1.1 Escenario 1

Para el escenario 1 se escogió el ambiente de prueba *Base Coverage Urban* el cual se centra en el despliegue de macroceldas y cubre desde usuarios pedestres hasta usuarios en vehículos con velocidades superiores. Este escenario se muestra en la figura 2.1 y muestra a 3 eNB con área de cobertura hexagonal de 1 Km de radio. Los eNB se encuentran separados a una distancia de 1732 Km. Los parámetros que definen este ambiente de pruebas son $d_{cor} = 50$ m y $\sigma = 8$.

2.1.2 Escenario 2

Para el escenario 2 se modificó el escenario 1 agregando un conjunto de 35 femtoceldas como se muestra en la figura 2.2.

Las femtoceldas se encuentran separadas 100m. El objetivo de ponerlas con esa distribución parte de la necesidad de estudiar los efectos del mecanismo de *handover* a profundidad, haciendo a los UE moverse en un área cercana a las femtoceldas. De otra manera si la distribución de las femtoceldas fuera más aleatoria usando el modelo de movilidad RWMM no habría forma de garantizar que durante el tiempo de simulación la mayoría de los UE se muevan o pasen por áreas cercanas a las femtoceldas con lo cual los resultados obtenidos no responderían a los objetivos de este trabajo.

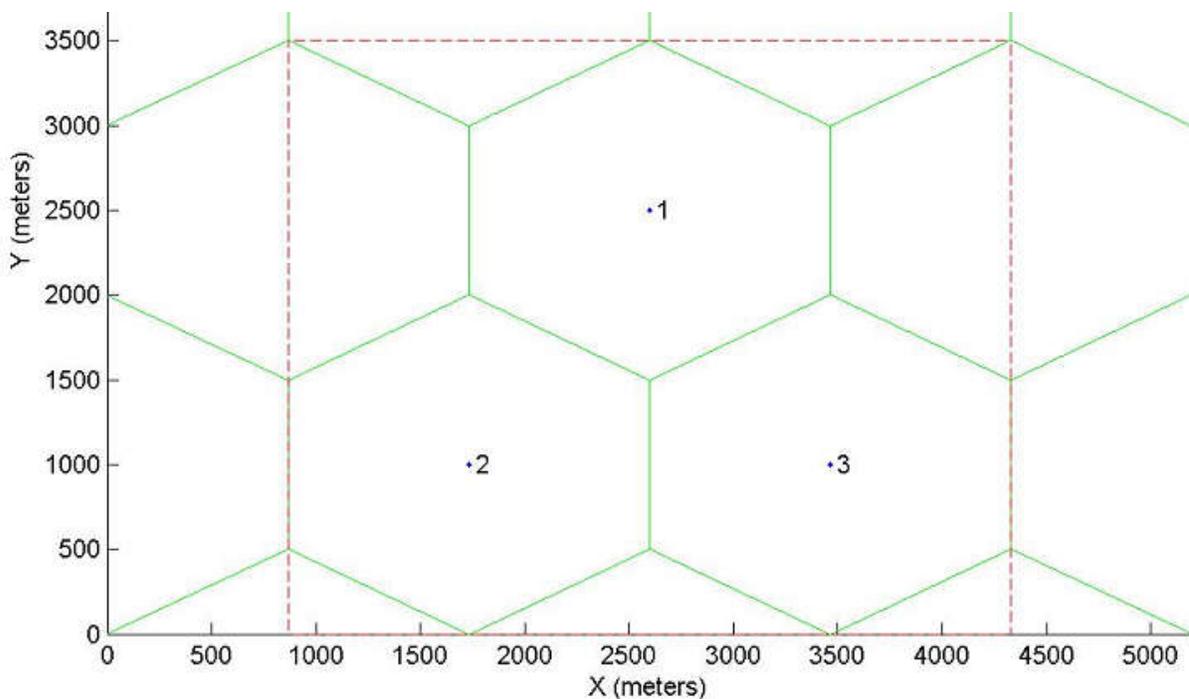


Figura 2.1 Escenario 1

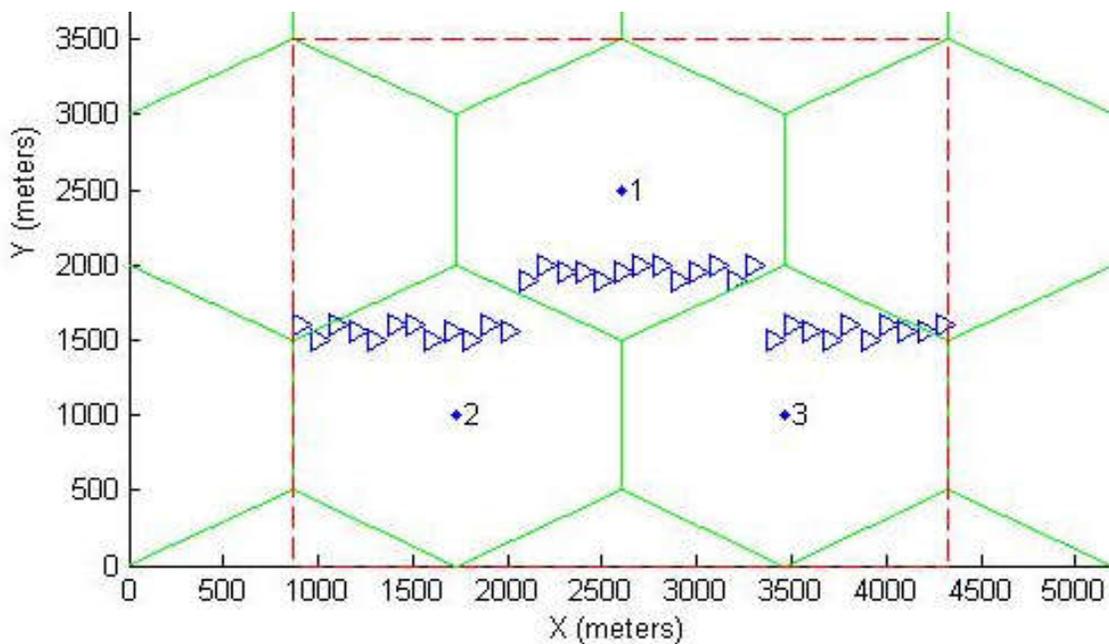


Figura 2.2 Escenario 2

2.2 Modelo de movilidad

En el proceso de simulación de redes inalámbricas la movilidad es un componente fundamental. Para obtener resultados de simulación precisos es un prerequisite poseer un buen entendimiento de las propiedades fundamentales de la movilidad de los nodos. La caracterización de las propiedades del modelo de movilidad es el punto de partida para la derivación de resultados analíticos concernientes a redes móviles. Un ejemplo notable del impacto del modelado de movilidad en el proceso de simulación y análisis de redes inalámbricas, es el modelo de movilidad de vector aleatorio RWPM. [33]

El RWMM ha sido usado por varios investigadores en la evaluación del desempeño de sistemas de redes inalámbricas y de sistemas móviles celulares [34]. La descripción de este modelo se expone en [35] y [36]:

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_k luego de alcanzar la posición (x_k, y_k) donde t^p_k 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 la figura 2.3 se muestra el comportamiento del modelo RWPM

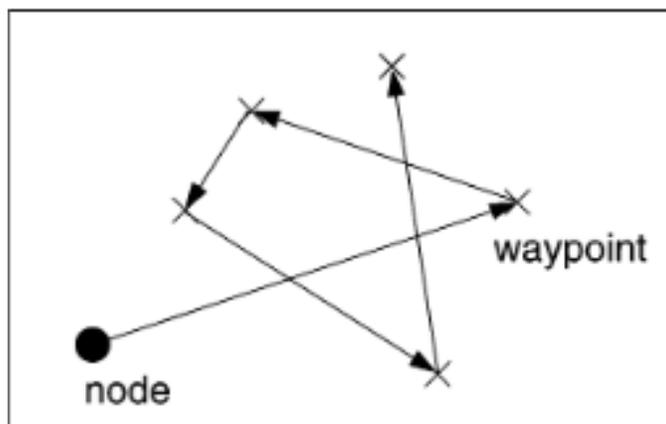


Figura 2.3 Modelo RWPM [37]

La implementación de este modelo en Matlab tiene los siguientes atributos:

1. V_POSITION_X_INTERVAL: Intervalo de recorrido en el eje horizontal
2. V_POSITION_Y_INTERVAL: Intervalo de recorrido en el eje vertical
3. V_SPEED_INTERVAL: Intervalo de velocidades
4. V_PAUSE_INTERVAL: Intervalo de pausa
5. V_DIRECTION_INTERVAL: Intervalo de dirección (ángulo)

En el presente trabajo se utiliza el RWMM con intervalo de pausa igual cero, por lo que el UE se mantiene siempre en movimiento. El intervalo de velocidad es constante durante todo el tiempo de simulación, pudiendo ser 7, 18, 72, 126 y 280 Km/h correspondientes a UE con baja, media, alta y súper alta velocidad. Esta distribución de velocidades es también usada en el experimento descrito en [38]. Al llegar a uno de los bordes de la región, el UE modifica su trayecto de manera que el ángulo de reflexión sea igual al ángulo de incidencia.

2.3 Modelo de radio propagación

La radio propagación se refiere al comportamiento de las ondas electromagnéticas cuando se propagan desde el transmisor hacia el receptor. Esto afecta el nivel de la señal recibida en el extremo receptor [39]. 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 multi trayecto [26]. La Relación Señal a Ruido más Interferencia 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 eNB y UE cercanos.

2.3.1 Pérdidas de trayecto

Las pérdidas de trayecto constituyen la reducción de la densidad de potencia de las ondas electromagnéticas como consecuencia de su propagación a través del espacio libre. Pueden ser el resultado de varios efectos combinados: pérdidas de espacio libre, refracción, difracción, reflexión y absorción. 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. [40]

En los sistemas móviles la potencia recibida en el UE o la BS, en función de la distancia, disminuye de manera más marcada que en el espacio libre. Esto es especialmente cierto 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.

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 de acuerdo con [41] y [32]. La ecuación 2.1 define la expresión de cálculo para las pérdidas de trayecto.

$$PL = l + 10n \log d \quad (2.1)$$

Donde:

l : Constante de pérdidas de trayecto

n : Exponente de pérdidas de trayecto

d : Distancia entre transmisor y receptor

La constante de pérdidas de trayecto no es más que el valor de pérdidas de trayecto a una distancia de referencia mientras que el exponente de pérdidas de trayecto describe la rapidez con que disminuye la potencia de la señal al aumentar la distancia.

En el presente trabajo se utilizan los siguientes valores para el cálculo de las pérdidas de trayecto:

1. Macrocelas: Para el escenario de macrocelas $l = 138.7120$ y $n = 36.378$ al igual que los usados en el experimento descrito en [31]
2. Femtoceladas: Para el escenario de femtoceladas $l = 17.52$ y $n = 43.3$ de acuerdo con [32]

2.3.2 Desvanecimiento por ensombrecimiento

El desvanecimiento lento se refiere a 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. El desvanecimiento lento z_1 puede ser modelado como un proceso aleatorio gaussiano log normal con media cero, desviación estándar σ determinada por el ambiente de simulación, y función de auto correlación exponencialmente decreciente con la distancia, mostrada en la ecuación (2.2) [41]

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

Donde:

x : Distancia recorrida por el UE entre dos intervalos de muestreo

d_{cor} : Distancia de correlación

En el presente trabajo se utilizan los siguientes valores según [32]:

1. Macrocelas: Para el escenario de macrocelas $d_{cor} = 50$ y $\sigma = 6$
2. Femtoceladas: Para el escenario de femtoceladas $d_{cor} = 6m$ y $\sigma = 4$

2.3.3 Desvanecimiento por multi trayecto

Cuando se transmite una señal llegan al receptor una componente directa (si hay visibilidad directa) y múltiples ecos con amplitudes, fases y tiempos de llegada diferentes. Centrándose en el tiempo como variable, a este efecto se le denomina dispersión temporal. La dispersión temporal produce interferencia inter símbolo ISI en el dominio del tiempo, y en el dominio de

la frecuencia, desvanecimiento selectivo en frecuencia para sistemas de banda ancha. Como consecuencia la señal recibida experimenta una distorsión.

La tecnología de acceso OFDMA es robusta frente a la ISI y al desvanecimiento selectivo en frecuencia. Además, es en entornos micro celulares donde la envolvente de la señal se contamina con el desvanecimiento por multi trayecto, y las predicciones del modelo teniendo en cuenta solo el desvanecimiento lento son menos exactas. En base a estos dos elementos, el desvanecimiento por multi trayecto no es considerado al igual que en [31]

2.3.4 Ruido térmico

El término ruido se refiere a señales no deseadas que están siempre presentes en los sistemas eléctricos. Hay una fuente natural de ruido, llamado térmico, que no puede ser eliminada. El ruido térmico es causado por la temperatura disipada por los movimientos de los electrones. La principal característica espectral del ruido térmico es que la densidad espectral de potencia es la misma para toda frecuencia de interés en la mayoría de los sistemas de comunicaciones. La potencia de ruido térmico en el receptor está dada por (2.3)

$$N = k_B T B \quad (2.3)$$

Donde:

k_B : Constante de Boltzmann

T : Temperatura en Kelvin

B : Ancho de banda en Hz

El valor de k_B 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 el ruido de fondo total es $N_0 \cdot B = -104$ dBm, valor usado también en [31]

2.3.5 Interferencia

En escenarios de comunicaciones móviles reales, la interferencia debido a las transmisiones de las celdas vecinas, también referida como interferencia inter-celdas, es por lo general la fuente principal que atenta contra la calidad del enlace de radio, aún más que el ruido. Una diferencia importante entre la interferencia y el ruido es que la interferencia, por lo general, tiene una estructura determinada que la hace al menos predecible en algunos casos, de manera que pueda ser reducida y hasta eliminada totalmente en situaciones específicas.

LTE está diseñado para operar con rehuso de frecuencia de una celda, lo que implica que los mismos recursos tiempo frecuencia pueden ser usados en celdas vecinas. Desde el punto de vista de eficiencia del sistema, tener acceso en cada celda a todo el espectro disponible y operar con rehuso de frecuencia de una celda es beneficioso. Sin embargo, esto puede conllevar a variaciones relativamente grandes en la SINR, y por lo tanto en las razones de datos. El desempeño del sistema, y especialmente la calidad de los usuarios en el borde de las celdas, pueden ser mejorados mediante la coordinación de la planificación entre celdas. El objetivo básico de la Coordinación de Interferencia Inter Celda ICIC es, si es posible, evitar

planificar transmisiones de forma simultánea en celdas vecinas hacia/desde terminales en el borde de la celda [42]. Con el objetivo de simplificar el modelo de simulación en este trabajo no se tiene en cuenta la interferencia inter-celdas asumiendo que la planificación de frecuencias es la adecuada para el escenario en cuestión.

2.4 Mecanismo de handover

En el presente trabajo se va a utilizar un mecanismo de *handover* similar al descrito en el epígrafe 1.3, tomándose como parámetro para la toma de decisión de *handover* la relación señal a ruido en el receptor SNR. Teniendo en cuenta la pérdida de trayecto, el desvanecimiento lento y el ruido de fondo tratados en el epígrafe anterior la SNR puede ser calculada mediante (2.4) al igual que en [31]

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

Donde:

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

2.5 Pérdida de paquetes

La probabilidad de pérdida de paquetes P_{pl} puede ser hallada en función de la SNR, pues a pesar de que ocurre aleatoriamente y está determinada por los mecanismos de transmisión, los mecanismos correctores de errores entre otros, el principal parámetro es la calidad de la señal recibida. Por tanto, la probabilidad de pérdida de paquetes se incrementa rápidamente cuando la señal es menor que cierto valor umbral δ y puede ser modelada mediante (2.5) similar a [41]

$$P_{pl} = P(F_i < \delta) = Q((F_i - \delta)/\sigma_m) \quad (2.5)$$

Donde:

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

δ : Umbral de pérdida de paquetes

σ_m : Desviación estándar de F_i y se calcula como $0.5\sigma(1-R(x))$

$Q(x)$: 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 el experimento de [41]

2.6 Demora

Para calcular la demora se considera que la transmisión es continua y que por tanto el ajuste del buffer de reproducción hay que hacerlo en los periodos de actividad. Existen técnicas complejas para determinar el impacto de este proceso de ajuste sin embargo en esta investigación se considera que el crecimiento del buffer de reproducción se puede realizar de forma controlada con ajustes de tamaño igual a un paquete y espaciados a no menos de 5 paquetes.

Bajo estas condiciones es aceptable asumir que la técnica PLC del códec puede enmascarar la alteración de la señal sin impactar apreciablemente en la percepción de la calidad. Un proceso similar se propone cuando es necesario decrecer el tamaño del buffer.[43]

Con este proceder un evento como el *handover* con tiempo de interrupción igual a 120ms implicaría un total de $5 \times 6 = 30$ paquetes de audio y el posterior proceso de decrecimiento involucraría igualmente 30 paquetes.

Nótese que este ajuste implicaría que el evento de *handover* sea oportunamente anticipado pero podemos señalar que en la redes LTE actuales es posible anticipar este evento a partir del conocimiento de la velocidad, la trayectoria y los reportes de calidad de la señal.

2.7 Percepción de calidad QoE

Debido a la importancia que tiene dentro de las preferencias de los suscriptores, así como el compromiso de brindar el servicio con una calidad satisfactoria percibida por el usuario, resulta conveniente poder realizar mediciones de la calidad que ofrece la red de manera que esta se corresponda con la percibida por el usuario final.

La percepción de calidad es un concepto amplio que abarca la influencia de factores de diferentes dominios y disciplinas. Estos factores se pueden categorizar en tres pilares fundamentales: *system, human, context*, como se muestra en la figura 2.4. [44]

Para medir precepción de calidad percibida por el usuario, existen dos tipos de métodos utilizados: los métodos subjetivos y objetivos. Según los métodos objetivos la calidad se establece a través de la opinión del usuario mientras que la metodología de evaluación subjetiva más ampliamente usada es la del MOS estandarizada en la recomendación ITU-T P.800. [45]. Los métodos subjetivos representan la medida más fiable y respetada para medir la calidad percibida de la voz, pero resultan ser costosos y difíciles de implementar de forma permanente, en este sentido los métodos objetivos resultan ser los más apropiados [5]. Existen dos tipos de métodos de medición objetiva de calidad de voz propuestos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones ITU: los que utilizan métodos intrusivos, que basan su estimación en la comparación de señales y los métodos no intrusivos, que basan su estimación en los parámetros funcionales de red [46]. El principal inconveniente de los métodos objetivos es que estos no dan como resultado una representación directa de la calidad percibida por el usuario, por tanto se hace necesaria su calibración en base a los resultados obtenidos de los métodos subjetivos, fundamentalmente del MOS

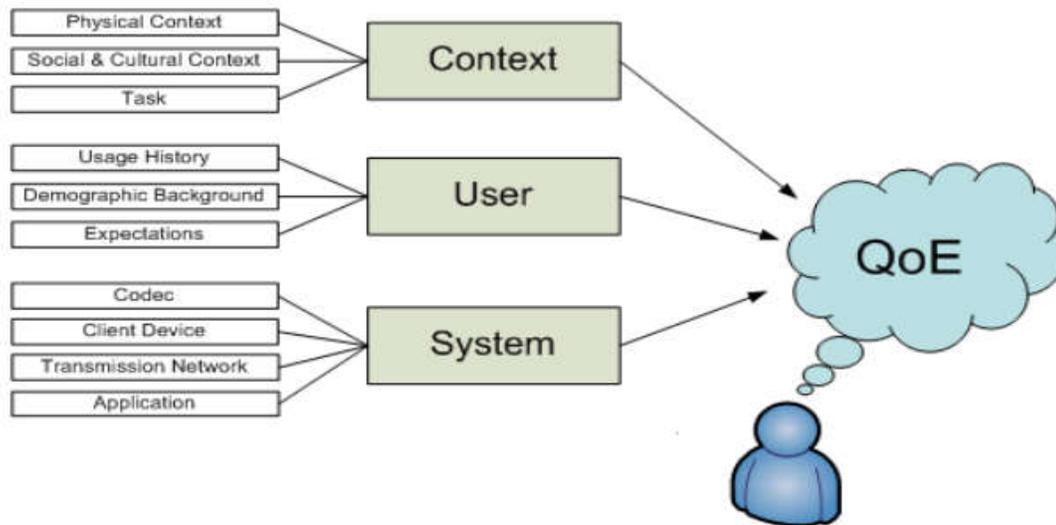


Figura 2.4: Pilares fundamentales de la QoE. [47]

2.7.1 Métodos de medición intrusivos

Los métodos intrusivos típicamente utilizan dos señales de entrada, una de referencia que constituye la señal original y una señal degradada tomada de la red que está siendo tomada para la evaluación de calidad. Los algoritmos intrusivos determinan cuantas muestras de audio recibidas son percibidas similarmente a la muestra original, esta determinación se basa en características de percepción humanas y son predichas de manera confiable mediante resultados de pruebas subjetivas, particularmente en el MOS.

Existen varios métodos objetivos de medición de calidad intrusivos entre los que se destacan los basados en el Dominio perceptual que funcionan en base a la percepción de audio humana y son considerados los mejores métodos de evaluación de calidad de voz dentro de esta gama. *Perceptual Speech Quality Measure* (PSQM), *Perceptual Analysis Measurement System* (PAMS), *Measuring Normalizing Block* (MNB), *Enhanced Modified Bark Spectral Distortion* (EMBSD) y *Perceptual Evaluation of Speech Quality* (PESQ), representan algunas de las variantes típicas de este método [48]

2.7.2 PESQ

ESQ es el último de los estándares intrusivos desarrollados por la UIT. La idea que maneja este estándar es la de estimar la degradación de una muestra de voz usando un modelo del sistema auditivo humano [49]. La figura 2.5 muestra un esquema del sistema PESQ.

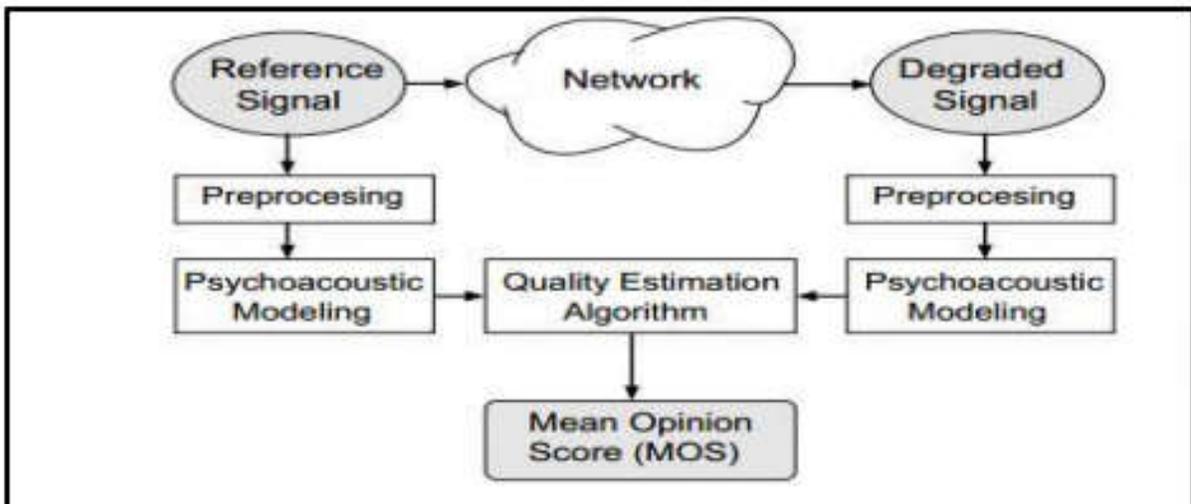


Figura 2.5 Estructura del proceso PESQ [50]

En el PESQ se analizan ambas señales y se calcula su representación en el dominio perceptual basado en un modelo psicoacústico. Las diferencias entre la señal original y la degradada son calculadas mediante un algoritmo de estimación del que se deriva un valor de MOS subjetivo. Lo esencial en este proceso es la transformación de la señal inicial y la degradada, en una representación interna que intenta reproducir la representación psicoacústica de señales de audio en el sistema auditivo humano, teniendo en cuenta la frecuencia por percepción y la sonoridad.

El modelo cognitivo de PESQ termina brindando una distancia entre la señal vocal inicial y la señal vocal degradada (“nota PESQ”), la que corresponde a su vez con una predicción de la MOS subjetiva. La nota PESQ se hace corresponder a una escala similar a la de MOS, un número único en una escala de $-0,5$ a $4,5$, aunque en la mayoría de los casos la gama de las salidas estará entre $1,0$ y $4,5$, que es la gama normal de valores de MOS que suelen darse en un experimento sobre la calidad de voz. La evaluación de la calidad de la conversación usada en PESQ es desarrollada off-line debido a su complejidad computacional. La validez de PESQ está suficientemente correlacionada con calificaciones subjetivas de la red [46].

2.7.3 Métodos no intrusivos

Los métodos no intrusivos, también conocidos como pasivos son desarrollados para ejecutar mediciones de tráfico de aplicaciones en tiempo real. A diferencia de los métodos intrusivos, estas mediciones son ejecutadas sin conocer la señal original. Los métodos tradicionales no intrusivos realizan su predicción directamente de diferentes parámetros de deterioro de la red IP, por ejemplo *jitter*, retardo y pérdida de paquetes [48]. La figura 2.6 muestra un esquema de esta técnica.

Los métodos no intrusivos estiman la calidad percibida utilizando directamente los parámetros funcionales de la red, en donde estos y la calidad percibida por el usuario están directamente relacionados y forman junto a otras medidas, la calidad de servicio entregada al usuario.

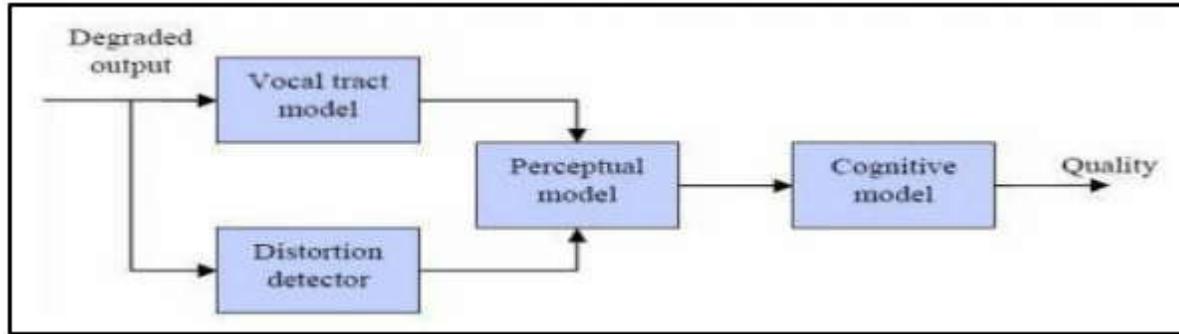


Figura 2.6 Técnica no intrusiva [51]

2.7.4 Modelo E

El método de medición objetiva más popular es el denominado Modelo E perteneciente a los métodos no intrusivos. Modelo E o E-Model, es una abreviatura de “European Telecommunications Standards Institute ETSI Computation Model”, el cual fue desarrollado por un grupo de la ETSI seleccionado por la UIT. El modelo E se diferencia de otros métodos debido a que él representa a la misma vez una herramienta de simulación de la red.[48]

Este modelo funciona en base a asumir que cada tipo de degradación de la calidad está asociado con cierto tipo de factor de daño. El resultado primario del modelo es una cuantificación escalar de la calidad de audio que se estima percibirá un usuario. Una característica fundamental de este modelo es la utilización de factores de degradación de la transmisión que reflejen los efectos de los modernos dispositivos de procesamiento de señales. El modelo E calcula, en base a varios parámetros medibles de la red, el factor R que puede relacionarse con una escala de MOS como muestra la tabla 2.2 [52]

El factor R se calcula a partir de la expresión 2.6 [53]:

$$R = R0 \quad Id \quad Ie_{eff} \quad (2.6)$$

Donde:

$R0$: Máximo valor posible para el factor R. Depende del códec de voz que se esté empleando. Este trabajo se basa en el códec G.722 a 23.05Kbps al igual que en [31] donde $R0 = 93.2$

Id : Factor de deterioro de retardo. Depende de la demora extremo a extremo

Ie_{eff} : Factor de deterioro de equipamiento. Se calcula a partir de la probabilidad de pérdida de paquetes P_{pl} y de los factores B , I_e , $BurstR$ y B_{pl} que son propios del códec escogido. En este trabajo se utiliza el códec G.722 al igual que en [31] con lo cual los parámetro anteriores toman los valores siguientes:

$B = 129$ para *codecs* de banda ancha como el G.722

$I_e = 1$

$B_{pl} = 13$

$BurstR = 1$ asumiendo pérdidas aleatorias

Tabla 2.1 Relación del parámetro R con el MOS [54]

Factor-R	Calidad	MOS
$90 < R < 100$	Excelente	4.34 - 4.5
$80 < R < 90$	Buena	4.03 - 4.34
$70 < R < 80$	Media	3.60 - 4.03
$60 < R < 70$	Mala	3.10 - 3.60
$50 < R < 60$	Pésima	2.58 - 3.10

2.8 Consideraciones finales del capítulo

El proceso de *handover* tiene un impacto importante en la calidad que perciben los usuarios en las redes LTE con femtoceldas. Evaluar esta influencia, requiere la utilización de un simulador que soporte la movilidad de los usuarios y los mecanismos de *handover*. El modelo de simulación elaborado permite obtener el comportamiento de la demora MTE y la pérdida de paquetes, considerando la ocurrencia de *handovers*. La decisión de *handover* se basa en la calidad de la señal recibida por el UE, para lo cual se ha modelado el canal de radio según las especificaciones del 3GPP y de la UIT.

CAPÍTULO 3. EVALUACION DE LA PERCEPCION DE CALIDAD

El número de *handovers* tiene gran repercusión en el desempeño de redes LTE en presencia de movilidad, al igual que en el resto de los sistemas móviles celulares. Un número demasiado alto de *handovers* provoca un incremento en la demora del flujo de datos que se intercambia entre los usuarios. Por otra parte, si el número de *handovers* es insuficiente, puede afectarse la calidad de la señal recibida y por consiguiente, elevarse la probabilidad de pérdida de paquetes. Tanto la demora como la pérdida de paquetes tienen una influencia significativa en la calidad percibida por los usuarios.

En este capítulo se presentan los resultados de simulaciones con el fin de analizar el impacto que posee en la percepción de calidad el empleo de los mecanismos de *handover* en redes LTE con femtoceldas. El experimento 1 se centra en un escenario solo de macroceldas y se evalúa para varios valores de offset y velocidad el factor R. En el experimento 2 se añaden a este escenario un grupo de femtoceldas y se repite el experimento para evaluar el factor R en presencia de las femtoceldas. En el experimento 3 se emplea un mecanismo de *handover* basado en la velocidad del UE en el escenario del experimento 2 para evaluar una posible mejora en la percepción de la calidad.

3.1 Características generales

En los experimentos se asume que tanto los eNB como los HeNB poseen los recursos suficientes para poder realizar un *handover* una vez que se cumpla el criterio escogido al igual que en [31]. Todos los experimentos consideran valores de O_c , O_f y TTT iguales a cero. El valor de offset se varía desde 0 dB hasta 5dB en pasos de 0.5 dB. En la tabla 3.1 se presentan los parámetros de la simulación

Es necesario aclarar que si bien el modelo de movilidad RWMM se ajusta bien al escenario 1 donde solo hay macroceldas quizá para el escenario 2 podría pensarse que no es el más adecuado en presencia de femtoceldas debido a que en los lugares de despliegue de las mismas el movimiento no es exactamente aleatorio y las velocidades son más bajas. Sin embargo, podríamos decir que límites eNB / HeNB son nebulosos, y es difícil determinar exactamente cuando el usuario se mueven al interior de un área de femtoceldas y cambia su velocidad. Hay varios artículos como [38] que consideran el RWMM incluso en presencia de femtoceldas.

3.2 Experimento 1

El experimento 1 está basado en el escenario 1 descrito en el epígrafe 2.1.1. Se basa en un entorno *Base Coverage Urban* con tres eNB con cobertura hexagonal de 1Km de radio y separados 1732 m.

Tabla 3.1 Parámetros de simulación

Parámetro	Valor
Número de eNB	3
Número de HeNB	35
Potencia de transmisión de los eNB	43 dBm
Potencia de transmisión de los HeNB	20 dBm
Ancho de banda	10 MHz
Frecuencia central	2 GHz
Pérdidas de trayecto para los eNB	$138.7120+36.783*d$ (km)
Pérdidas de trayecto para los HeNB	$17.52+43.3*d$ (m)
Desviación estándar del desvanecimiento lento σ para el escenario 1	8
Desviación estándar del desvanecimiento lento σ para el escenario 2	4
Distancia de correlación d_{cor} para el escenario 1	50
Distancia de correlación d_{cor} para el escenario 2	6
Potencia de ruido (N)	-104 dBm
Umbral de pérdidas de paquete (δ)	-4 dB
Modelo de movilidad	RWMM con pausa 0 y velocidad constante
Tiempo de simulación	600 s
Cantidad de UE	50

Se utiliza como parámetro de decisión de handover la relación señal a ruido en el receptor SNR. Durante un tiempo de 600s se mueven 50 UE y se evalúa la percepción de calidad durante el proceso de handover. Para ello se simula con un barrido de offset desde 0.5dB hasta 5dB en pasos de 0.5 dB. Además se realizan simulaciones para varios valores de velocidad señalados en 2.2.

En la figura 3.1 se muestran la cantidad de *handovers* promedio. Se observa que a medida que aumenta el offset se desestimula el proceso de *handover* y que para valores de offset pequeños a las mayores velocidades le corresponden el mayor número de *handovers*.

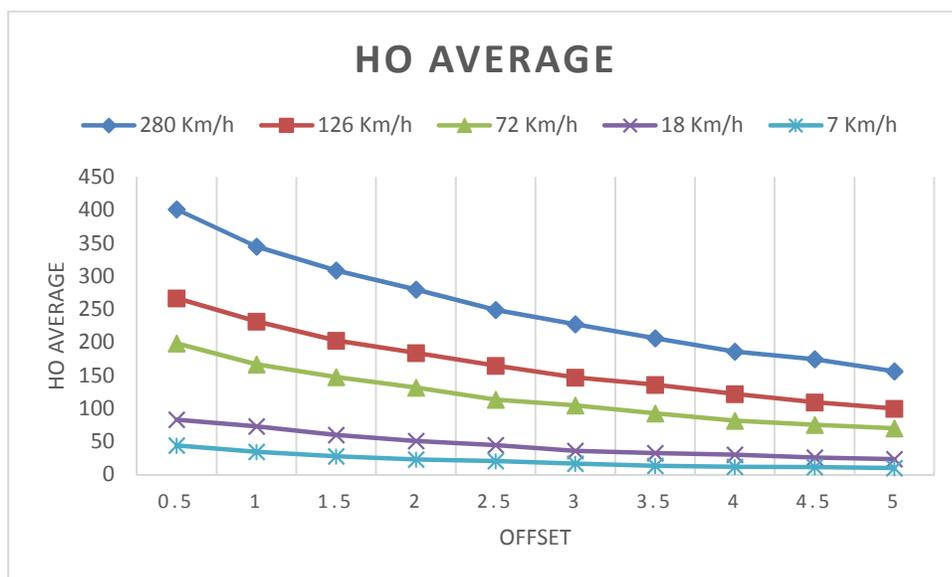


Figura 3.1 Handovers promedio en el experimento 1

En la figura 3.2 podemos ver la demora promedio en el experimento 1. Al igual que en caso de los *handovers* el comportamiento es similar porque con el aumento de las cantidad de handover aumenta la demora extremo a extremo MTE en la red.

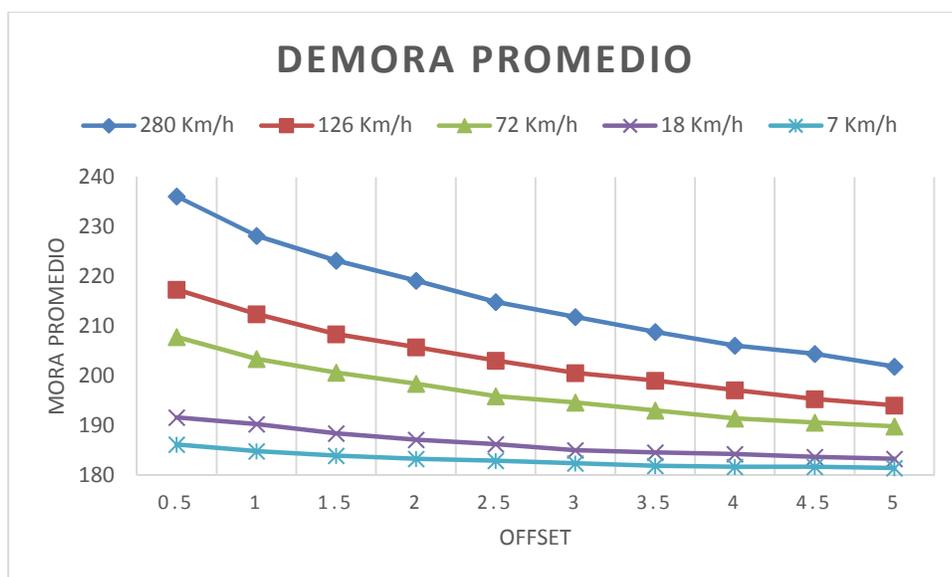


Figura 3.2 Demora promedio en el experimento 1

En la figura 3.3 observamos el factor R del experimento 1. En este escenario aun a altas velocidades el proceso de handover conlleva a valores de demora en el rango permisible de 250ms según [38] es por eso que todos los valores del factor R se encuentran en la escala entre 80 y 90 correspondientes a casi todos los usuarios satisfechos según la tabla de

conversión al MOS referida en [53]. Se hace necesario destacar que en los escenarios donde la cantidad de handovers es alta y donde se garantiza una zona de cobertura casi continua en toda el área de simulación la probabilidad de perdida de paquetes está siempre por debajo del 1% y no influye prácticamente en la percepción de calidad.

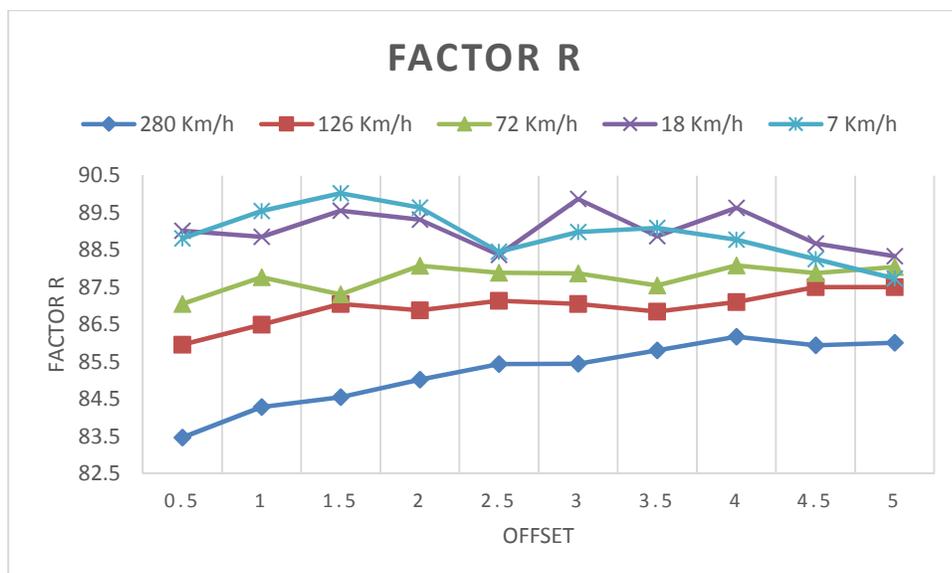


Figura 3.3 Factor R en el experimento 1

3.3 Experimento 2

El experimento 2 consiste en introducir un área de femtoceldas dentro del escenario de macroceldas del experimento 1 de acuerdo con la distribución mostrada en la figura 2.2. Este experimento pretende evaluar para valores similares de velocidad y offset que influencia tiene sobre la percepción de calidad el proceso convencional de handover una vez que se introducen las femtoceldas en la red. Para ello es necesario modificar la función RWMM para lograr que todos los UE se muevan en una zona cercana a las femtoceldas durante el tiempo de simulación.

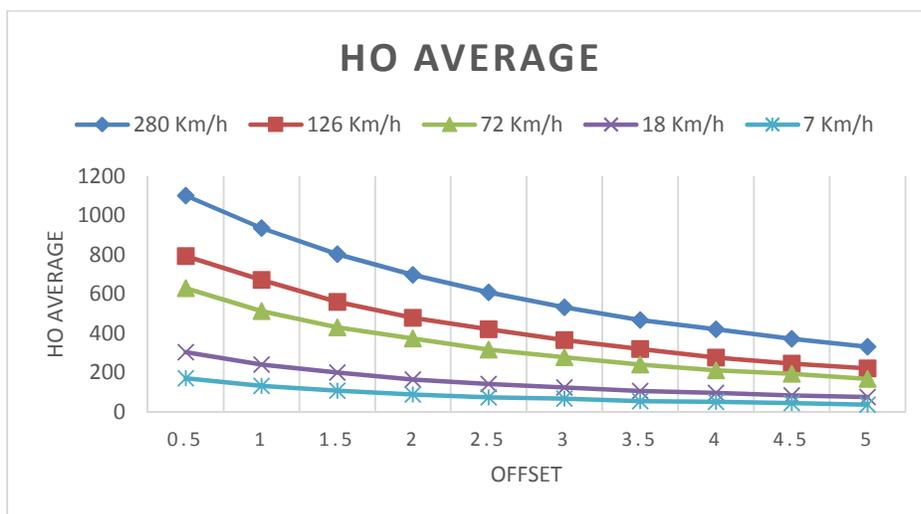


Figura 3.4 Handovers promedio en el experimento 2

En la figura 3.4 se muestra el número de *handovers* promedio en el nuevo experimento. Como se aprecia la distribución de *handovers* con respecto a la velocidad es similar al experimento 1 pero en este caso aumenta apreciablemente la cantidad de *handovers*. Esto se debe al movimiento a altas velocidades en zonas de cobertura continua de femtoceldas, que debido a su alta densidad y cercanía, puede provocar fenómenos dañinos como el efecto ping-pong, que puede afectar la percepción de la calidad.

En la figura 3.5 se muestra la demora promedio en el experimento 2. Como se muestra al ocurrir un elevado número de *handover* la demora puede aumentar notablemente llegando incluso a sobre pasar el umbral de 250 ms o sea tomando valores inaceptables para servicios de voz.

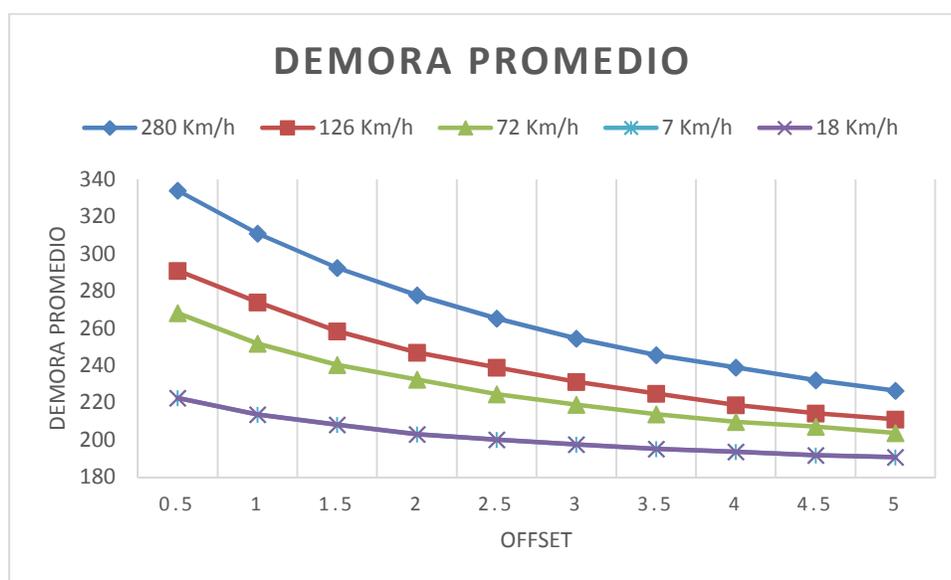


Figura 3.5 Demora promedio en el experimento 2

En cuanto a la percepción de calidad en la figura 3.6 se muestra el factor R para el experimento 2. Como se puede observar para valores de velocidades mayores a 72 Km/h y offset menor de 3 dB el factor R cae por debajo de 80 provocando que la percepción de calidad se vea degradada y que existan algunos usuarios insatisfechos. Este fenómeno podría verse afectado aún más con concentraciones mayores de femtoceldas como podría ocurrir en la práctica.

3.4 Experimento 3

En el tercer experimento se pretende emplear uno de los mecanismos descritos en el epígrafe 1.4.1 con el objetivo de mejorar la QoE en el escenario de una red LTE con femtoceldas. Se escogió un algoritmo sencillo basado en la velocidad del UE y en la premisa de que cuando la dicha velocidad supera un umbral, no tiene sentido realizar un *handover* hacia la femtocelda ya que un tiempo muy corto después ocurrirá otro *handover* hacia la macrocelda o hacia otra femtocelda. Esta familia de algoritmos basados en la velocidad son ampliamente propuestos como solución de algoritmo de *handover* para redes LTE con femtoceldas El escenario es el

mismo del experimento 2 y el mecanismo de handover es el mismo, solo con la particularidad de que cuando la velocidad es mayor de 50Km/h no se permite el *handover* hacia una femtocelda y el UE es forzado o bien a quedarse en la macrocelda o a buscar una celda candidata entre las otras macroceldas.

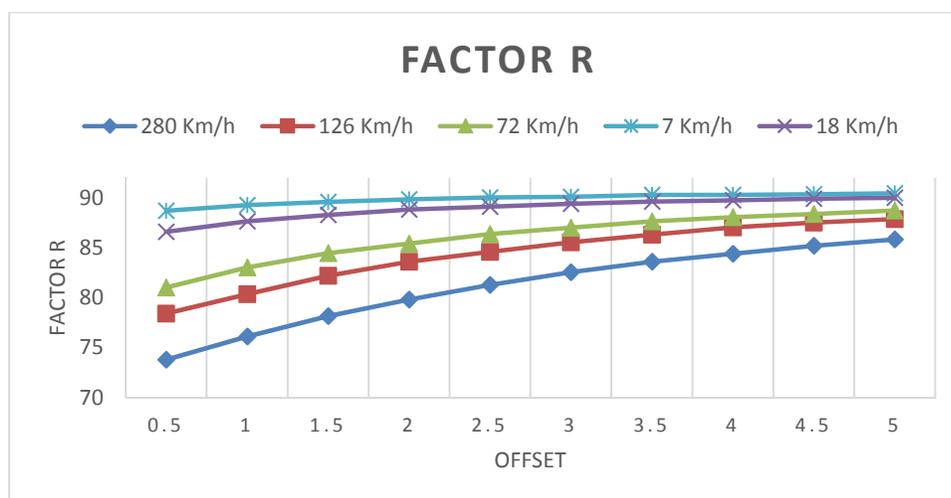


Figura 3.6 Factor R en el experimento 2.

En la figura 3.7 se muestra el resultado del número promedio de handover. Como se puede apreciar hubo una disminución con respecto al gráfico de la figura 3.4 para las velocidades de 72Km/h, 126 Km/h y 128 Km/h siendo mayor la diferencia para velocidades más altas. Se observa también que las gráficas se cruzan porque no todas las velocidades son afectadas por el algoritmo.

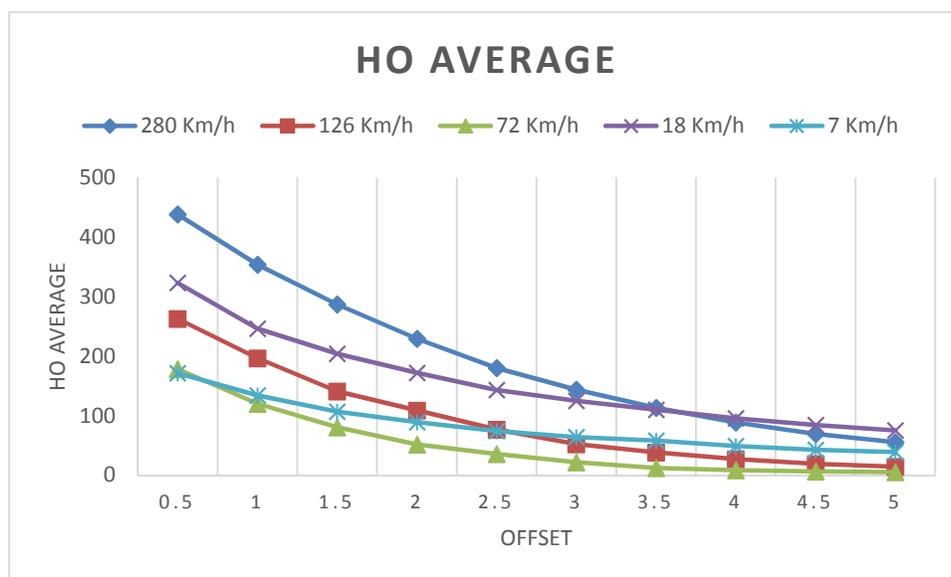


Figura 3.7 Handovers promedio en el experimento 3

En la figura 3.8 se muestra la demora promedio en el experimento 3. Se observa la misma tendencia del gráfico de *handovers* promedio.

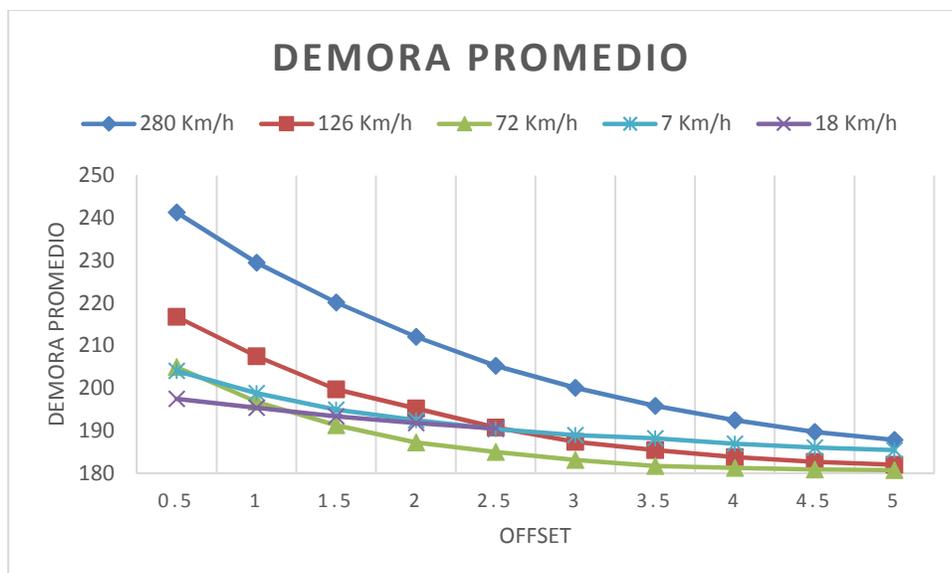


Figura 3.8 Demora promedio en el experimento 3

Por ultimo tenemos el gráfico del factor R en el experimento 3. Se aprecia las mayores ganancias para los valores mayores de velocidad

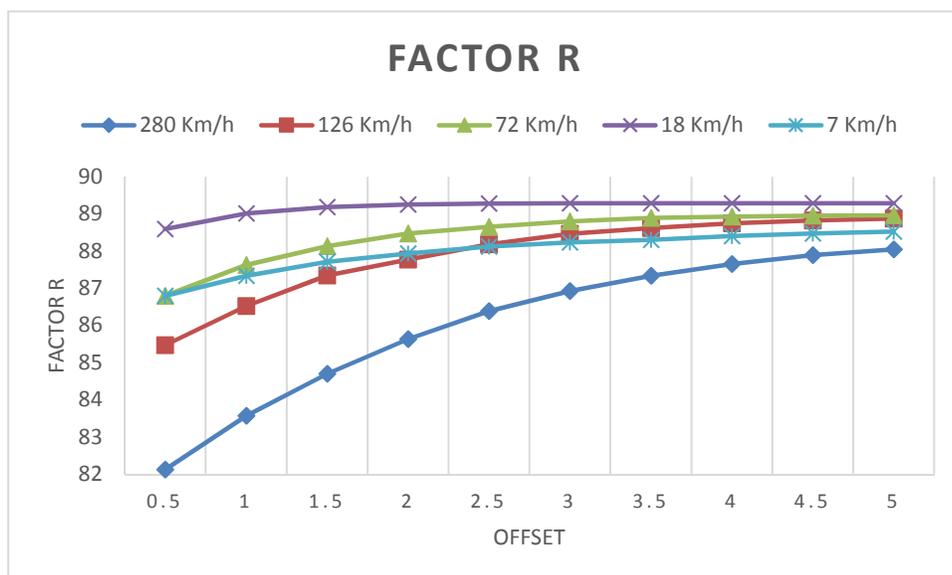


Figura 3.9 Factor R para el experimento 3

3.5 Resumen

A manera de resumen se presenta la tabla 3.1 que muestra la ganancia y/o pérdida en cuanto a factor R promedio para todos los valores de *handover* offset del algoritmo basado en velocidad aplicado en el experimento 3 con respecto a los resultados obtenidos en los experimentos 1 y 2 para los distintos valores de velocidad.

Tabla 3.1 Ganancia en factor R del algoritmo basado en la velocidad del UE

Exp	280 Km/h	126 Km/h	72 Km/h	18 Km/h	7 Km/h
1	85.2 (-0.82)	86.95 (-0.93)	87.75(-0.67)	89.05 (-0.12)	88.93 (0.95)
2	81.07 (-4.96)	84.33 (-3.55)	86.00 (-2.42)	88.90 (-1)	89.87 (1.89)
3	86.03 (-)	87.88(-)	88.42(-)	89.17 (-)	87.98(-)

Como podemos ver en la tabla para los valores de velocidad medio y alto el algoritmo basado en velocidad del experimento 3 tiene mejores desempeños aunque en comparación con el experimento 1 de solo macroceldas las ganancias son mínimas. A medida que la velocidad disminuye el experimento 2 va teniendo el mejor desempeño. Por lo que podemos concluir que a altas velocidades el *handover* en redes con femtoceldas puede traer consigo una disminución en la percepción de la calidad y es necesario la aplicación de algún algoritmo que contribuya a revertir esa situación. Mientras que a velocidades bajas las redes con femtoceldas tienen un buen desempeño y su uso puede ser importante para mejorar la cobertura en interiores y lograr un servicio de mayor calidad y con mayor razón de transferencia de datos.

El grafico de la figura 3.10 también ilustra la conclusión anterior mostrando las curvas de MOS para los valores extremos de velocidad concebidos en este trabajo. Se observa como el algoritmo de *handover* basado en velocidad tiene el mejor desempeño a la velocidad máxima y a velocidad mínima la red de femtoceldas con algoritmo convencional empieza a mostrar mejores resultados para valores de offset por encima de los 2.5 dB

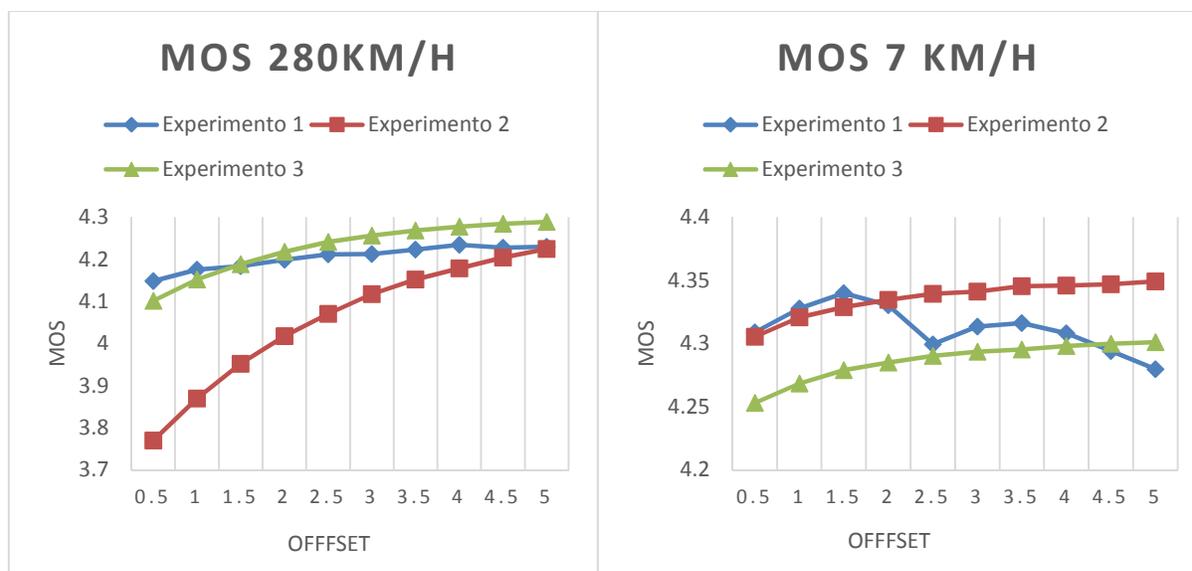


Figura 3.10 Curvas de MOS para velocidades mínima y máxima

3.6 Consideraciones finales del capítulo

En este capítulo fueron presentados los resultados de experimentos que permitieron medir el impacto en la percepción de calidad de los mecanismos de *handover* en redes LTE con femtoceldas. Este estudio permitió llegar a las siguientes conclusiones:

1. Los mecanismos convencionales de *handover* pueden ser empleados en redes LTE con femtoceldas cuando la movilidad es a baja velocidad pero es necesario configurar adecuadamente los parámetros de *handover*. Es este estudio en particular para bajas velocidades comenzó a verse un impacto positivo para valores de *handover* offset mayores a 2.5 dB
2. Cuando las velocidades son medias, altas y súper altas, el empleo de mecanismos convencionales de *handover* puede impactar negativamente en la percepción de calidad, siendo necesario el estudio y la aplicación de otros mecanismos de *handover* que puedan minimizar ese impacto negativo

CONCLUSIONES

Como resultado de la investigación realizada, se arribó a las siguientes conclusiones:

1. En las especificaciones de LTE, la arquitectura de femtoceldas se ha propuesto para mejorar fuertemente la calidad de servicio de la tecnología inalámbrica de última generación. Debido a las limitaciones de las macroceldas para servir a los usuarios que están geográficamente situados en lugares de mala recepción de la señal, la arquitectura de femtoceldas constituye una solución potencial para servir a una pequeña gama de puntos de acceso para interiores.
2. El mecanismo de *handover* es fundamental dentro de la gestión de movilidad y asegura la continuidad del servicio ante el movimiento constante del UE. LTE soporta solamente HO de tipo duro, el cual produce interrupción en la conexión entre el UE y el eNB durante un breve periodo de tiempo, incrementándose la demora y/o la pérdida de paquetes. Por tanto, el número de *handovers* debe ser controlado porque puede afectar la percepción de calidad.
3. Para evaluar el impacto de los mecanismos de HO en la percepción de la calidad, es necesario utilizar un simulador que soporte la movilidad de los usuarios. El modelo de simulación desarrollado permite utilizar los diferentes parámetros para recrear las condiciones del canal de radio propuestas para la evaluación de las RAT y variar la velocidad de desplazamiento del UE, para cumplir con las especificaciones del 3GPP. El modelo E es un modelo matemático ampliamente utilizado para evaluar la percepción de calidad desde el punto de vista de los usuarios.
4. Los resultados obtenidos en la simulación muestran que para los UE que se mueven a bajas velocidades dentro de una red LTE con femtoceldas, los mecanismos convencionales de *handover* tienen un impacto positivo en la percepción de calidad con relación a las redes sin femtoceldas cuando el offset de *handover* supera los 2.5 dB.
5. En las redes LTE con femtoceldas, cuando los UE se mueven a media, alta y súper alta velocidad, los mecanismos convencionales de *handover* impactan negativamente en la percepción de calidad y se hace necesario el empleo de otros mecanismos de *handover*, como por ejemplo el *handover* basado en la velocidad, que permitan revertir ese impacto negativo.

RECOMENDACIONES

Debido a la influencia que tiene el mecanismo de handover en la calidad percibida por los usuarios y la creciente introducción de femtoceldas en las redes LTE se recomienda:

1. Continuar investigando acerca de nuevos algoritmos de *handover* para redes LTE con femtoceldas que permitan tener un impacto positivo en la percepción de la calidad o al menos permitan minimizar el impacto negativo del mecanismo de *handover*.
2. Diseñar modelos que permitan evaluar la eficacia de estos mecanismos, saber en qué escenarios podemos aplicar uno u otro y poder escoger el más adecuado para mejorar la calidad de experiencia percibida por los usuarios durante el proceso de *handover*.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. G. Kachhavay and A. P.Thakare. (2014)." 5G Technology-Evolution and Revolution". *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, [online]. Vol-3(Issue 3). Disponible en: <http://www.ijcsmc.com>
- [2] *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced)*, 3GPP TR 36.913 V13.0.0 2015
- [3] A. M. López. (2009)." LTE/SAE, una apuesta segura en la evolución de las redes móviles". *Antena de Telecomunicación* [online]. Disponible en: coitt.es/res/revistas/08c_Rep_LTE_MN3.pdf
- [4] W. H. Chi, Z. Fan, and R. Haines, (2014, 2014/10/28). *Emerging Technologies and Research Challenges for 5G Wireless Networks* [on line]. Available: <http://www.arxiv.org/pdf/1402.6474>
- [5] C. Cicconetti. (2013)." 5G Radio Network Architecture". *Radio Access Spectrum, Aveiro, Portugal* [online].
- [6] A. mitra. (2014)." Handoffs in hierarchical macro/femto networks and an algorithm for efficient handoffs". *Department of electronics and communication engineering* [online]. *Masters in technology(211EC4106)*, 66. Disponible en: ethesis.nitrkl.ac.in/6478/1/E-34.pdf
- [7] J. Chen, P. Rauber, D. Singh, C. Sundarraman, P. Tinnakornsrisuphap, and M. Yavuz. (2010)." Femtocells – Architecture & Network Aspects". [online]. Disponible en: <https://www.qualcomm.com/.../qualcomm-research-s>
- [8] H. Zhang, XiangmingWen, B. Wang, W. Zheng, and Y. Sun. (2010)." A Novel Handover Mechanism between Femtocell and Macrocell for LTE based Networks". [online]. Disponible en: <http://www.researchgate.net/publication/232632162>
- [9] J. M. Ruiz Avilés, "Algoritmos de reparto de tráfico en femtoceldas corporativas LTE," 2015.
- [10] A real-time services performance and interference mitigation for femtocell scenarios in LTE networksM. Iturralde, T. A. Yahiya, A. Wei, and A. Beylot, "A real-time services performance and interference mitigation for femtocell scenarios in LTE networks," in *Local Computer Networks (LCN), 2012 IEEE 37th Conference on*, 2012, pp. 529-536
- [11] P. Ghosal, S. Barua, R. Subramanian, S. Xing, and K. Sandrasegaran, "A NOVEL APPROACH FOR MOBILITY MANAGEMENT IN LTE FEMTOCELLS," *International Journal of Wireless & Mobile Networks*, vol. 6, p. 45, 2014.
- [12] An efficient femtocell-to-femtocell handover decision algorithm in LTE femtocell networksM. Rajabizadeh and J. Abouei, "An efficient femtocell-to-femtocell handover decision algorithm in LTE femtocell networks," in *Electrical Engineering (ICEE), 2015 23rd Iranian Conference on*, 2015, pp. 213-218

- [13] S. A. Reddy, "Handover Management in Femtocell Networks," Auburn University, 2014.
- [14] J. G. Andrews, H. Claussen, M. Dohler, S. Rangan, and M. C. Reed, "Femtocells: Past, present, and future," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 30, pp. 497-508, 2012.
- [15] W. Kim. (2010)." Femtocell Network Architecture". [online]. Disponible en: www.airvana.com/.../WHITEPAPER-Femtocell_Network_Architecture
- [16] *Medium Access Control (MAC) Protocol specification*, 3GPP TS 36.33 v13.3.0, 2016
- [17] A new handover strategy between femtocell and macrocell for LTE-based networks.-J. Wu, "A new handover strategy between femtocell and macrocell for LTE-based network," in *Ubi-Media Computing (U-Media), 2011 4th International Conference on*, 2011, pp. 203-208
- [18] A policy-based handover mechanism between femtocell and macrocell for LTE based networksT. Bai, Y. Wang, Y. Liu, and L. Zhang, "A policy-based handover mechanism between femtocell and macrocell for LTE based networks," in *Communication Technology (ICCT), 2011 IEEE 13th International Conference on*, 2011, pp. 916-920
- [19] R. A. Saeed, *Femtocell Communications and Technologies: Business Opportunities and Deployment Challenges: Business Opportunities and Deployment Challenges*: IGI Global, 2012.
- [20] H. Holma and A. Toskala, *LTE for UMTS-OFDMA and SC-FDMA based radio access*: John Wiley & Sons, 2009.
- [21] A. K. Salkintzis, M. Hammer, I. Tanaka, and C. Wong, "Voice call handover mechanisms in next-generation 3GPP systems," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 47, pp. 46-56, 2009.
- [22] M. Poikselkä, H. Holma, J. Hongisto, J. Kallio, and A. Toskala, *Voice over LTE (VoLTE)*: John Wiley & Sons, 2012.
- [23] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker. (2009). *LTE: the UMTS long term evolution* [online].
- [24] J.-S. Kim and J.-H. Kim, "Handover ranging power adjustment using uplink channel information in IEEE 802.16 e/m," *ETRI journal*, vol. 32, pp. 823-826, 2010.
- [25] A Handover Time Negotiation for Seamless Service in IEEE 802.16 EH. Lee and J. Kim, "A Handover Time Negotiation for Seamless Service in IEEE 802.16 E," in *Proc. IEEE MILCOM*, 2008, pp. 17-19
- [26] *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification*, TS 36.331 v12.3.0, 2014
- [27] Handover within 3GPP LTE: design principles and performanceK. Dimou, M. Wang, Y. Yang, M. Kazmi, A. Larmo, J. Pettersson, *et al.*, "Handover within 3GPP LTE: design principles and performance," in *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall), 2009 IEEE 70th*, 2009, pp. 1-5
- [28] T. F. Z. Badri, S. Rachid, and M. Wahbi. (2013)." Handover management scheme in LTE femtocell networks". *International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT) Vol* [online]. 5.
- [29] A. Feki, V. Capdevielle, L. Roullet, and A. G. Sanchez. (2013)." Handover aware interference management in LTE small cells networks". *Modeling & Optimization in*

- Mobile, Ad Hoc & Wireless Networks (WiOpt), 2013 11th International Symposium on* [online]. 49-53.
- [30] *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Policy and charging control architecture, 3GPP TS 23.203 V13.7.0* 2016
- [31] H.-J. Lee and J.-H. Kim, "A Handover Mechanism Considering the Abstracted R-Factor," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, pp. 2687-2696, 2014.
- [32] M. Series, "Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced," *Report ITU*, pp. 2135-1, 2009.
- [33] D. Mitsche, G. Resta, and P. Santi, "The random waypoint mobility model with uniform node spatial distribution," *Wireless networks*, vol. 20, pp. 1053-1066, 2014.
- [34] E. Hytiä and J. Virtamo, "Random waypoint mobility model in cellular networks," *Wireless Networks*, vol. 13, pp. 177-188, 2007.
- [35] A. M. Wyglinski, M. Nekovee, and T. Hou, *Cognitive radio communications and networks: principles and practice*: Academic Press, 2009.
- [36] E. Hytiä, P. Lassila, and J. Virtamo, "Spatial node distribution of the random waypoint mobility model with applications," *IEEE Transactions on mobile computing*, vol. 5, pp. 680-694, 2006.
- [37] C. Bettstetter, H. Hartenstein, and X. Pérez-Costa, "Stochastic properties of the random waypoint mobility model," *Wireless Networks*, vol. 10, pp. 555-567, 2004.
- [38] A mobility prediction scheme of LTE/LTE-A femtocells under different velocity scenarios. M. R. Tabany and C. G. Guy, "A mobility prediction scheme of LTE/LTE-A femtocells under different velocity scenarios," in *Computer Aided Modelling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), 2015 IEEE 20th International Workshop on*, 2015, pp. 318-323
- [39] B. G. Lee and S. Choi, *Broadband wireless access and local networks: mobile WiMAX and WiFi*: Artech House, 2008.
- [40] J. M. H. Rábanos, *Comunicaciones móviles*, 2004.
- [41] G. Senarath, W. Tong, P. Zhu, H. Zhang, D. Steer, D. Yu, *et al.*, "Multi-hop relay system evaluation methodology (channel model and performance metric)," *IEEE C802. 16j-06/013r3*, 2007.
- [42] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband*: Academic press, 2013.
- [43] B.-K. Lee and J.-H. Chang, "Novel adaptive muting technique for packet loss concealment of ITU-T G. 722 using optimized parametric shaping functions," *EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing*, vol. 2016, pp. 1-12, 2016.
- [44] E. Liotou, D. Tsolkas, N. Passas, and L. Merakos. (2015). "Quality of experience management in mobile cellular networks: key issues and design challenges". *Communications Magazine, IEEE* [online]. 53(7), 145-153.
- [45] Monitoring VoIP call quality using improved simplified E-model. H. Assem, D. Malone, J. Dunne, and P. O'Sullivan, "Monitoring VoIP call quality using improved simplified E-model," in *Computing, networking and communications (ICNC), 2013 international conference on*, 2013, pp. 927-931

- [46] V. T. Veetil, "Voice over lte study and test strategy definition," Arizona State University, 2014.
- [47] R. Schatz, T. Hoßfeld, L. Janowski, and S. Egger, "From packets to people: quality of experience as a new measurement challenge," in *Data traffic monitoring and analysis*, ed: Springer, 2013, pp. 219-263.
- [48] F. De Rango, M. Tropea, P. Fazio, and S. Marano, "Overview on VoIP: Subjective and objective measurement methods," *International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 6, pp. 140-153, 2006.
- [49] A. Helenius, "Performance of Handover in Long Term Evolution," *Aalto University, Helsinki, Finland*, 2011.
- [50] The impact of QoS support on the end user satisfaction in LTE networks with mixed traffic. Siomina and S. Wanstedt, "The impact of QoS support on the end user satisfaction in LTE networks with mixed traffic," in *2008 IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2008, pp. 1-5
- [51] L. F. P. Martínez, "Gráficos de control multivariables aplicados a la estimación de la calidad percibida de la voz sobre ip," *Revista Ingeniería Industrial*, vol. 6, 2014.
- [52] H. Jin, C. Cho, N.-O. Song, and D. K. Sung, "Optimal rate selection for persistent scheduling with HARQ in time-correlated Nakagami-m fading channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, pp. 637-647, 2011.
- [53] T. ITU, "Recommendation G. 107 The E-model, a computational model for use in transmission planning," 2015.
- [54] R. G. Cole and J. H. Rosenbluth, "Voice over IP performance monitoring," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 31, pp. 9-24, 2001.

