

## **ESTUDIO DEL IMPACTO DEL *HANDOVER* EN REDES LTE.**

**Pablo M. Aviles Delgado, Carlos A. Rodríguez López, Samuel Montejo Sánchez, Rigoberto López Fernández, Erisbel Orozco Crespo.**

RADIOCUBA, Edif. 3 apto 15 Chicho Torres e/ Martí y Onelio Hernández, Ciego de Ávila, UCLV, UCLV,  
ETECSA, UCLV  
e-mail:[pablom910@nauta.cu](mailto:pablom910@nauta.cu)

### **RESUMEN**

La última generación de sistemas móviles usa la tecnología de acceso radio de Evolución a Largo Plazo (LTE). Al igual que en las tecnologías precedentes, LTE debe realizar handover (HO) para asegurar la movilidad ininterrumpida. Este trabajo presenta un estudio del impacto del HO en redes LTE, considerando de forma exhaustiva el impacto de los parámetros que inciden en la decisión de HO. En correspondencia con trabajos recientes, la evaluación del desempeño se estima en métricas de la percepción de la calidad de la voz.

**PALABRAS CLAVE:** *Handover*, histéresis, LTE, *offset*, TTT.

### **ABSTRACT**

Long Term Evolution (LTE) radio access technology is used by latest generation of mobile systems. Like the preceding technologies, LTE should make handover (HO) to ensure seamless mobility. This paper presents a study of HO impact on LTE networks, considering the impact of HO decision parameters exhaustively. In correspondence with recent investigations, performance evaluation is estimated based on voice quality perception metrics.

**KEYWORDS:** Handover, hysteresis, LTE, offset, TTT.

# INTRODUCCIÓN

LTE (Long Term Evolution) es un estándar de comunicaciones móviles de cuarta generación, significativamente diferente a las tecnologías empleadas en las redes de tercera generación o sus antecesoras en lo referente principalmente a la transmisión de voz, ya que utiliza la conmutación de paquetes en lugar de la conmutación de circuitos para brindar este servicio. LTE tiene como objetivos proporcionar altas razones de transmisión de datos, baja latencia en términos de establecimiento de la conexión y transmisión, costo por bit reducido implicando una eficiencia espectral mejorada, arquitectura de red simplificada, consumo de potencia razonable para el equipo terminal o equipo de usuario (UE, User Equipment), y tecnología de acceso radio (RAT, Radio Access Technology) que soporte el uso flexible del espectro, ya sea en las bandas de frecuencia existentes o en otras nuevas. La arquitectura de la red está diseñada con el fin de soportar el tráfico de conmutación de paquetes con movilidad ininterrumpida y calidad de servicio (QoS, Quality of Service) [1]. El sistema emplea técnicas de antenas múltiples (MIMO, Multiple Inputs Multiple Outputs), un ancho de banda de 20 MHz y está optimizado para velocidades bajas de hasta 15 km/h, sin embargo, las especificaciones permiten el uso de velocidades de hasta 350 km/h con cierta degradación del desempeño [1], y hasta 500 km/h dependiendo de la banda de frecuencia [2].

Un elemento clave en la movilidad es el handover (HO), que consiste en el traspaso de una estación base (eNB, evolved Node B) a otra mientras el terminal está en modo RRC\_CONNECTED, es decir, mientras se mantiene una sesión de datos o una llamada de voz. La función del HO es conmutar la conexión del eNB en servicio hacia un eNB objetivo para mantener la conectividad del UE. Por tanto, el HO debe realizarse con demora y pérdida de paquetes imperceptibles para las llamadas de voz, y con transmisión confiable para los servicios de datos.

Investigaciones recientes se han enfocado en el estudio de diferentes mecanismos de HO con el objetivo de optimizar el desempeño de la red [3]-[12]. Se han realizado varios estudios sobre HO basado en el evento A3 definido para LTE. Sin embargo, la mayoría de los autores han tratado principalmente el efecto que tiene retardar o apresurar la decisión de HO en la razón de HOs fallidos o de ping-pong [6]-[11]. Considerar la pérdida de paquetes permite medir cómo se impacta la calidad de servicio al variar el número de HOs. En [12] se determina la probabilidad de pérdida de paquetes mediante la función complementaria de error basándose en la calidad de la señal de radio.

A pesar de realizar una cuidadosa búsqueda no se encontró un trabajo previo que combine el estudio integral del impacto del ajuste de los parámetros del evento A3 con la probabilidad de pérdida de paquetes. En el presente trabajo se realiza un análisis del impacto que tiene en el número de HOs y la probabilidad de pérdida de paquetes variar los parámetros involucrados en el evento A3. Incluir en el estudio la pérdida de paquetes permite asociar el resultado del ajuste de los parámetros con la percepción de la calidad que experimentan los usuarios de servicios de telefonía.

Este trabajo está estructurado de la manera siguiente. En la Sección 2 se explican los tipos de HOs en LTE y los principales elementos involucrados en la decisión de HO. Se detallan los eventos disparadores de informes definidos en LTE haciendo énfasis en el evento A3. La Sección 3 describe el modelo de simulación utilizado. En la Sección 4 son presentados los resultados de las simulaciones.

## HANDOVER EN LTE

### Tipos de *handover*

En general, existen dos tipos de HO: HO duro y HO suave. El HO duro requiere que el UE interrumpa momentáneamente la conexión con la estación base en servicio para poder conectarse con la estación base objetivo, pues el UE puede estar conectado solo con una estación base a la vez. El uso de este tipo de HO reduce la complejidad del proceso de HO y minimiza la demora del mismo, pero introduce un tiempo de interrupción de la comunicación entre el UE y el eNB. Por otra parte, en el mecanismo de HO suave el UE siempre mantiene al menos un enlace de radio activo con la red móvil, por lo que no se produce interrupción. Sin embargo, este tipo de HO requiere de funcionalidades extras en el UE para mantener más de una conexión, y también necesita un mayor número de procedimientos de señalización [13].

En LTE solo se utiliza el HO duro, el cual es a su vez dividido en otras categorías dependiendo de si se realiza entre dos RATs iguales o diferentes. Así, existe HO intra-LTE e inter-RAT, siendo el primer tipo aquel en el que tanto la estación base en servicio como la estación base objetivo pertenecen a LTE, y el segundo tipo aquel en el que una de las dos estaciones base pertenece a LTE y la otra pertenece a una tecnología de acceso que no es LTE. Además, el HO intra-LTE se puede subdividir en intra-frecuencia e inter-frecuencia dependiendo de si la celda objetivo se encuentra en la misma frecuencia o no, así como en HO basado en X2 y HO basado en S1 dependiendo de la interfaz que es utilizada para el intercambio de los mensajes de señalización durante la fase de preparación de HO. En el HO basado en X2 los mensajes de señalización son intercambiados directamente entre los dos eNBs sin la inclusión de la entidad de gestión de movilidad (MME, Mobile Management Entity). El HO basado en S1 es necesario cuando la interfaz X2 no puede ser usada (o no existe) o cuando debe cambiarse la MME [14]. En la Figura 1 se muestra la arquitectura de red LTE simplificada para representar las interfaces que intervienen en el proceso de HO intra-LTE.

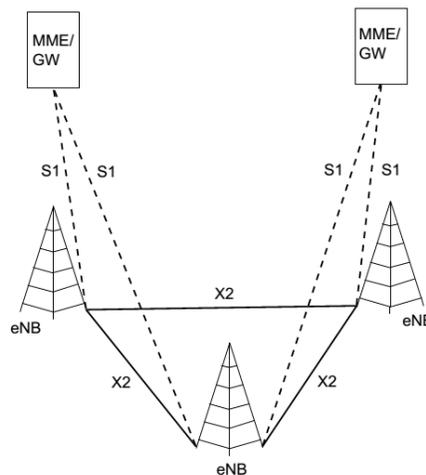


Figura 1: Interfaces para el intercambio de mensajes de señalización de HO

### Patrones de intervalos de medición

En LTE el nivel de la señal está dado por la potencia recibida de la señal de referencia (RSRP, Reference Signal Received Power) y la calidad, por la calidad recibida de la señal de referencia (RSRQ, Reference Signal Received Quality). Cualquiera de los dos parámetros puede ser usado para la evaluación, y es el eNB quien indica cuál debe ser usado. En el caso de las mediciones intra-frecuencia, estas son realizadas sin necesidad de interrumpir la transmisión o recepción por parte del UE. Sin embargo, en el caso de las mediciones inter-frecuencia o inter-RAT, el UE debe interrumpir la comunicación con el eNB en servicio para realizar la medición, y posteriormente volver a resintonizarse. En LTE se definen dos patrones de intervalos de medición que pueden ser configurados, ya sea periódicamente o disparados por eventos [16]. Ambos patrones se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1: Intervalos de medición soportados en LTE**

Id del patrón	Duración del intervalo [ms]	Periodo de repetición [ms]
0	6	40
1	6	80

### Tiempo de interrupción de HO

En el HO intra-LTE el tiempo de interrupción de HO se define como el tiempo entre el final del último intervalo de tiempo de transmisión (TTI, Transmission Time Interval) que contiene el comando RRC (usado para ejecutar el HO) en el antiguo canal físico compartido del enlace descendente (PDSCH, Physical Downlink Shared CHannel) y el momento en el que el UE inicia la transmisión del nuevo canal físico de acceso aleatorio (PRACH, Physical Random Access CHannel), sin incluir la demora de procedimiento RRC. Cuando se recibe un comando de HO, el tiempo de interrupción debe ser menor que  $T_{int}$  calculado en (1) [15].

$$T_{int} = T_{busq} + T_{IU} + 20ms \quad (1)$$

donde:

T<sub>busq</sub>: tiempo requerido para buscar la celda objetivo si no es conocida y

T<sub>IU</sub>: tiempo de incertidumbre en encontrar la primera ocasión PRACH disponible en la nueva celda.

El tiempo de incertidumbre puede ser de hasta 30 ms, mientras que el tiempo de búsqueda puede ser considerado 0 ms ya que la celda objetivo ha sido medida por el UE antes de realizar el HO. Por tanto, el tiempo de interrupción de HO será igual o menor que 50 ms.

### Eventos disparadores en LTE

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 [15] 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 2 se muestran los eventos definidos para LTE.

**Tabla 2: Eventos disparadores en LTE**

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

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

Los eventos A1 y A2 pueden ser utilizados para cancelar y disparar las mediciones inter-frecuencia e inter-RAT, respectivamente. Ambos eventos consideran solamente la celda en servicio. Una vez que el UE esté realizando las mediciones de las celdas vecinas, entonces puede utilizar los eventos A3, A4 o A5 para realizar un HO. Este artículo se centra en el 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 *offset* específico de celda permite que se consideren características propias de cada celda para disparar el evento, mientras que el *offset* específico de frecuencia 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 [15].

Si el evento es disparado inmediatamente luego que su condición de entrada se cumple, entonces el HO puede producirse frecuente e innecesariamente en algunos casos. Por ejemplo, considérese un UE que se mueve en la frontera de dos celdas vecinas. La señal que percibe el UE proveniente de ambas celdas fluctuará debido al desvanecimiento lento. El UE se enlazará alternadamente con una y otra celda, produciéndose lo que se denomina efecto ping-pong. Este efecto desperdicia recursos de señalización, disminuye el throughput del sistema, e incrementa la pérdida de paquetes y la demora. Estos dos últimos elementos tienen un impacto significativo en la calidad percibida por el usuario en los servicios de voz. Para disminuir el efecto ping-pong, se define otro parámetro conocido como tiempo de disparo (TTT, time to trigger). Si se cumple la condición de entrada y durante este tiempo, que puede ser

configurable, no se cumple la condición de abandono entonces el evento es disparado. Utilizar un TTT demasiado alto puede repercutir negativamente en la calidad de servicio, pues el UE tardará más tiempo en realizar el HO, y la señal puede caer hasta un nivel que incremente drásticamente la pérdida de paquetes, produciéndose incluso la interrupción del servicio. Por ello es importante una selección adecuada del TTT. Los valores permisibles de TTT son 0, 40, 64, 80, 100, 128, 160, 256, 320, 480, 512, 640, 1024, 1280, 2560, 5120 en ms [15]. En la Fig. 2 se muestra la posible ocurrencia de un evento A3, dependiendo del TTT configurado para el UE. Si se selecciona el TTT1 el evento A3 es disparado, pues luego de satisfacerse la condición de entrada no se cumple la condición de salida antes de que transcurra un tiempo igual a TTT1. Sin embargo, si se selecciona el TTT2, el evento A3 no es disparado, pues la condición de salida se satisface antes de finalizar el tiempo de disparo. En la figura 2 se han utilizado valores de  $O_f$  y  $O_c$  iguales a cero.

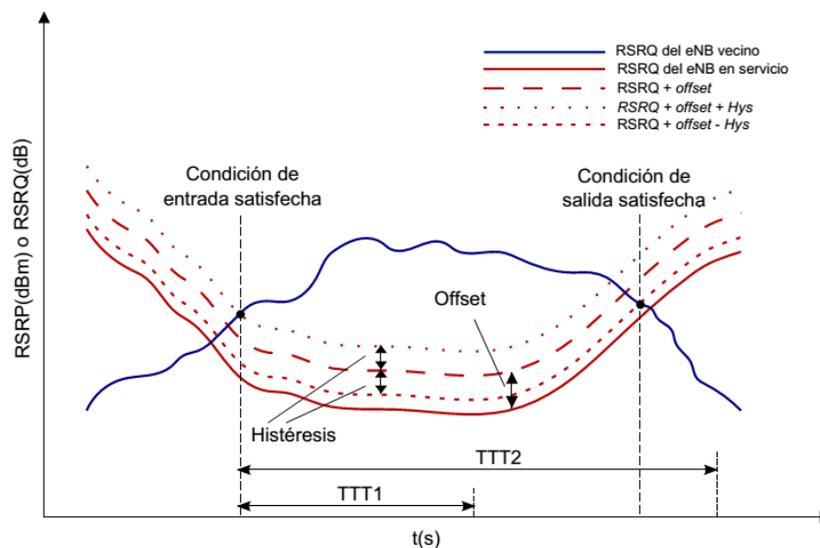


Figura 2: Representación gráfica del evento A3

El parámetro medido (RSRP o RSRQ) puede ser filtrado en la capa 3 utilizando (2) antes de ser usado para la evaluación de las condiciones que disparan el evento [15]. El filtro permite incluir en la evaluación la historia pasada.

$$F_i = (1-a)F_{i-1} + aM_i \quad (2)$$

donde:

$M_i$ : último resultado de medición recibido de la capa física,  
 $F_i$ : resultado de medición filtrado (actualizado), usado para la evaluación,  
 $F_{i-1}$ : resultado de medición filtrado (anterior), con  $F_0$  igual a  $M_1$  y  
 $a = (1/2)(k/4)$ , donde  $k$  es un valor recibido en la configuración.

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 [15].

## MODELO DE SIMULACIÓN

Con el objetivo de evaluar el impacto que tienen los parámetros que pueden ser configurados para disparar un HO basado en el evento A3, se realizan varias simulaciones basadas en el caso 3 del escenario de despliegue de macro celdas del 3GPP (3rd Generation Partnership Project) [17] y las recomendaciones de la UIT para la evaluación de tecnologías de interfaz radio para IMT-Advanced [18] usadas también en [12], utilizando un simulador desarrollado en Matlab. El escenario seleccionado es el macro suburbano (SMA, Suburban Macro), con velocidades de prueba de 3, 60 y 120 km/h. Los eNBs son desplegados utilizando una estructura de dos niveles (19 eNBs), además de otros 4 eNBs para usar un área de simulación rectangular con la mayor cobertura posible, en total 23 eNBs. Las celdas tienen forma hexagonal con antenas omnidireccionales ubicadas en el centro. La distancia interceldas (ISD, Intersite Distance) es de 1732 m. En la figura 3 se muestra el escenario con las celdas hexagonales. La región de simulación es el área comprendida por el rectángulo de líneas discontinuas.

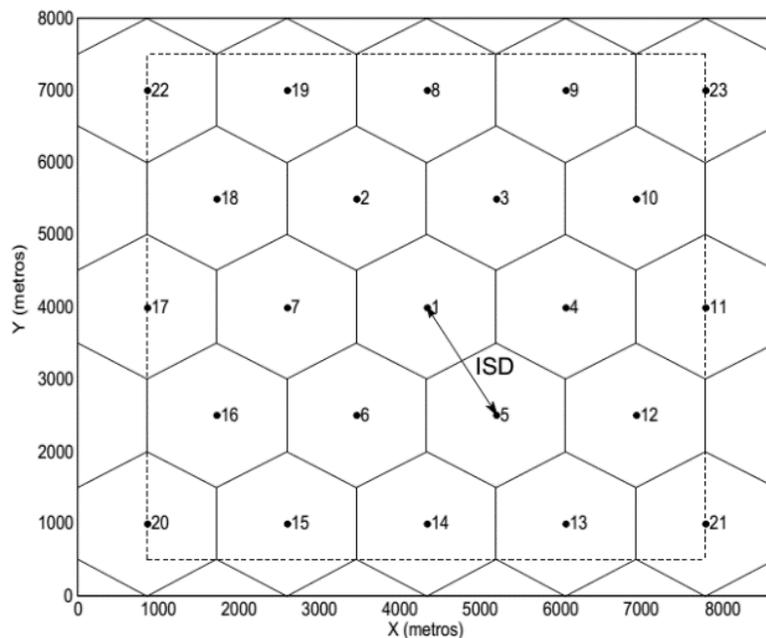


Figura 3: Ubicación y forma de las celdas

Se asume que todos los eNBs poseen suficientes recursos para soportar tráfico de voz [12], por lo que una vez que se cumple el criterio de HO, este se realiza. No se tiene en cuenta la interferencia. Las pérdidas de trayecto son halladas utilizando el modelo COST-231 Hata recomendado en [17] y usado en [12]. El UE mantiene activa una llamada de voz durante todo el tiempo de simulación. El modelo de movilidad utilizado es el *Random Waypoint Model*. Un UE es ubicado inicialmente de forma aleatoria en la región de simulación y se mueve a una velocidad constante durante todo el tiempo de simulación. 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. El tiempo de pausa es cero.

En cada instante de tiempo discreto  $i$ , la relación señal a ruido SNR es obtenida mediante (3):

$$M_i = p - (l + n \log d_i) + z_i - \text{pruido} \quad (3)$$

donde:

$p$ : potencia de transmisión del eNB,  
 $l$ : constante de pérdidas de trayecto,  
 $n$ : exponente de pérdidas de trayecto,  
 $d_i$ : distancia entre el UE y el eNB,  
 $z_i$ : término de desvanecimiento lento y  
 $\text{pruido}$ : potencia de ruido.

El desvanecimiento por multitrayecto no es considerado, al igual que en [12]. El desvanecimiento lento es modelado como un proceso aleatorio gaussiano lognormal [19], [20] con media cero, desviación estándar  $\sigma=8$ , y función de auto correlación exponencialmente decreciente con la distancia, dada por (4) [17].

$$R(\Delta x) = e^{-\frac{\Delta x}{d_{cor}}} \quad (4)$$

donde:

$\Delta x$ : distancia recorrida por el UE entre dos intervalos de muestreo y  
 $d_{cor}$ : distancia de correlación.

La distancia de correlación es 50 m para el escenario SMA, y la distancia recorrida por el UE  $\Delta x$  es calculada multiplicando la velocidad del UE por el intervalo de muestreo, que es seleccionado de 40 ms para considerar mediciones con este período de repetición. La SNR es filtrada usando (2) antes de utilizarse para la evaluación de la calidad según las especificaciones del 3GPP.

La demora y la pérdida de paquetes son dos parámetros que impactan de manera significativa en la QoS percibida por los usuarios de servicios de voz. Mientras mayor sea el número de HOs, mayor será la demora promedio, por lo que contabilizar el número de HOs resulta factible. La probabilidad de pérdida de paquetes  $P_{pl}$  puede ser hallada en función de la SNR usando (5), pues a pesar de que la pérdida de paquetes ocurre aleatoriamente y está determinada por los mecanismos de transmisión (como modulación o entrelazado), los mecanismos correctores de errores (como las retransmisiones y los FEC) 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 [12].

$$P_{pl} = P(F_i < PL_{th}) = Q\left(\frac{F_i - PL_{th}}{\sigma_{prom}}\right) \quad (5)$$

donde:

$F_i$ : SNR filtrada usando (2) con  $a = 0.5$  [12],  
 $PL_{th}$ : umbral de pérdida de paquetes (típicamente valor constante predefinido por el proveedor de red),

---

---

$\sigma_{prom}$ : desviación estándar de  $F_i$  y se calcula como  $0.5\sigma\{1-R(\Delta x)\}$  y  
 $Q(x)$ : función complementaria de error.

Optimizar el número de HOs tiene una gran repercusión en el desempeño de la red LTE en presencia de movilidad. Un número demasiado alto de HOs provoca un incremento en la demora del flujo de datos que se intercambia entre los usuarios. Por otra parte, si el número de HOs es insuficiente puede afectarse la calidad de la señal recibida y por consiguiente elevarse la probabilidad de pérdida de paquetes. La demora y la pérdida de paquetes tienen una influencia notable en la calidad percibida por los usuarios de servicios isócronos como la telefonía. Si la decisión de HOs está determinada por el evento A3, existen cuatro vías para optimizar el número de HOs: mediante la modificación de los parámetros offset e Hys, variando el parámetro k, variando el parámetro TTT, y mediante el ajuste de Oc y Of.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados de simulaciones variando offset, Hys, k y TTT. Los valores muestran intervalos de confianza para un nivel de confianza del 95 %. Se consideran valores de Oc y Of iguales a cero. Los valores de TTT escogidos son múltiplos enteros de 40 ms, por lo que  $TTT=j$  equivale a  $j*40ms$  (ej.  $TTT=1$  equivale a 40ms). Los valores de TTT utilizados son 0, 1, 2, 4, 8, 16 y 32. Otros parámetros comunes para la simulación (similar a [12], [17] y [18]) son mostrados en la Tabla 2.

Ante la naturaleza variable de la demora de arribo de los paquetes de voz se impone el uso de mecanismos de reproducción en el receptor, basados en buffer. Un buffer de reproducción con tamaño suficientemente alto permite absorber las variaciones del retardo en el flujo de voz. Sin embargo, se establece una relación de compromiso entre la demora adicional del buffer y la pérdida de paquetes. Nótese que incrementar arbitrariamente la demora hasta garantizar la reproducción de todos los paquetes que arriban al receptor puede afectar sensiblemente la interactividad de la comunicación. Sin perder la generalidad en esta investigación se asume que cuando el tamaño del buffer opera con una demora MTE (Mouth to Ear) de 180 ms es capaz de absorber las variaciones de la demora que no involucran al HO. La ocurrencia de este evento de interrupción provoca un incremento significativo y abrupto de la demora. En el presente trabajo se asume este valor igual a 120 ms, similar a [12]. Adicionalmente se asume que el mecanismo de reproducción aprovecha los intervalos de silencio para ajustar la demora MTE al valor típico de 180 ms, tras la ocurrencia de los eventos de HO.

Tabla 2: Parámetros comunes de simulación

Parámetro	Valor
Número de eNBs	23
ISD	1732 m
Potencia de transmisión de los eNBs ( $p$ )	46 dBm
Ancho de banda por eNB	10 MHz
Frecuencia central	2 GHz
Constante de pérdidas de trayecto ( $l$ )	138.7120
Exponente de pérdidas de trayecto	36.3783
Desviación estándar del desvanecimiento lento ( $\sigma$ )	8 dB
Distancia de correlación ( $d_{cor}$ )	50 m
Potencia de ruido ( $p_{ruido}$ )	-104 dBm
Umbral de pérdidas de paquete ( $PL_{th}$ )	-4 dB
Periodo de intervalos de medición	40 ms (mediciones periódicas)
Modelo de movilidad	<i>Random Waypoint Mobility</i> con tiempo de pausa cero

### Experimento 1

En este primer experimento se varía el valor de offset del evento A3 desde 1 dB hasta 9 dB en pasos de 1 dB. Se considera un valor de Hys=0 dB. El valor de k es 4 y la velocidad del UE es 120 km/h. El tiempo de simulación es igual a 300 s.

En la demora MTE influye el número de HOs realizados por el UE. Para modelar el comportamiento de la demora MTE a partir del ajuste del buffer, y teniendo en cuenta el tiempo de interrupción de HO, se utiliza una traza de conversación artificial donde los períodos de silencio y actividad fueron generados según la recomendación P.59 [21].

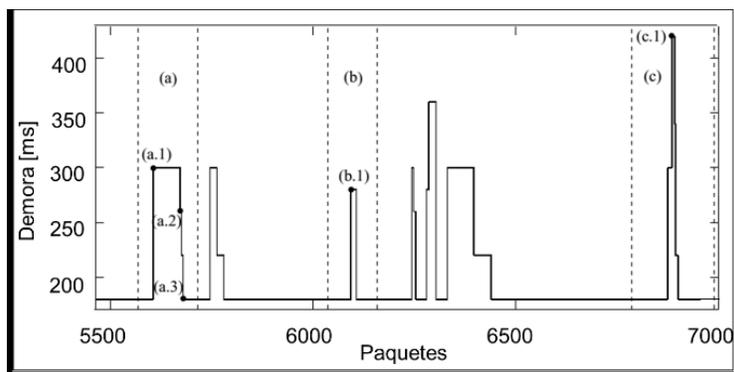


Figura 4: Comportamiento de la demora

En la figura 4 se presenta un segmento de la simulación, que permite ilustrar el comportamiento de la demora MTE del flujo de media. Nótese que tras la ocurrencia de un HO la demora se incrementa en 120 ms, y el mecanismo de reproducción opera en los intervalos subsiguientes. En la sección (a) de la figura 4 se observa que la demora que experimenta el paquete 5606 es de 300 ms (punto a.1), que se mantiene hasta el ajuste del buffer durante un intervalo de silencio de 40 ms, siendo la demora del paquete 5672, 260 ms (punto a.2). Una nueva ráfaga de actividad obliga a mantener la demora MTE en

260 ms, y no es hasta el paquete 5680 que se alcanza el valor típico de 180 ms (punto a.3). En la sección (b) de la figura 4 se muestra la ocurrencia de un HO en el instante en que se produce un intervalo de silencio de 20 ms (punto b.1), mientras que la sección (c) muestra un pico de 400 ms (punto c.1) debido a la ocurrencia de HOs consecutivos sin que aparezcan intervalos de silencio.

En la figura 5 se observan los resultados para valores de TTT de 0 y 8. Para ambos TTTs, a medida que aumenta el offset, el número de HOs experimentado por el UE disminuye pues la condición de entrada del evento A3 exige que la diferencia entre la calidad de la señal de la celda vecina y la calidad de la señal de la celda en servicio sea mayor. Asimismo, al aumentar el valor de TTT para un mismo offset, disminuye la cantidad de HOs. Un TTT mayor implica que la calidad de la señal de la celda vecina debe superar la calidad de la señal de la celda en servicio durante más tiempo para disparar el evento A3. El número de eventos A3 iniciados es el mismo para cualquier valor de TTT. Sin embargo, en la medida en que TTT aumenta, la condición de salida (abandono) es satisfecha para un mayor número de esos eventos. En la figura 5 (a) se observa que para un offset de 1 dB el número medio de HOs para TTT=0 es aproximadamente 100, mientras que para TTT=8, es inferior a 40.

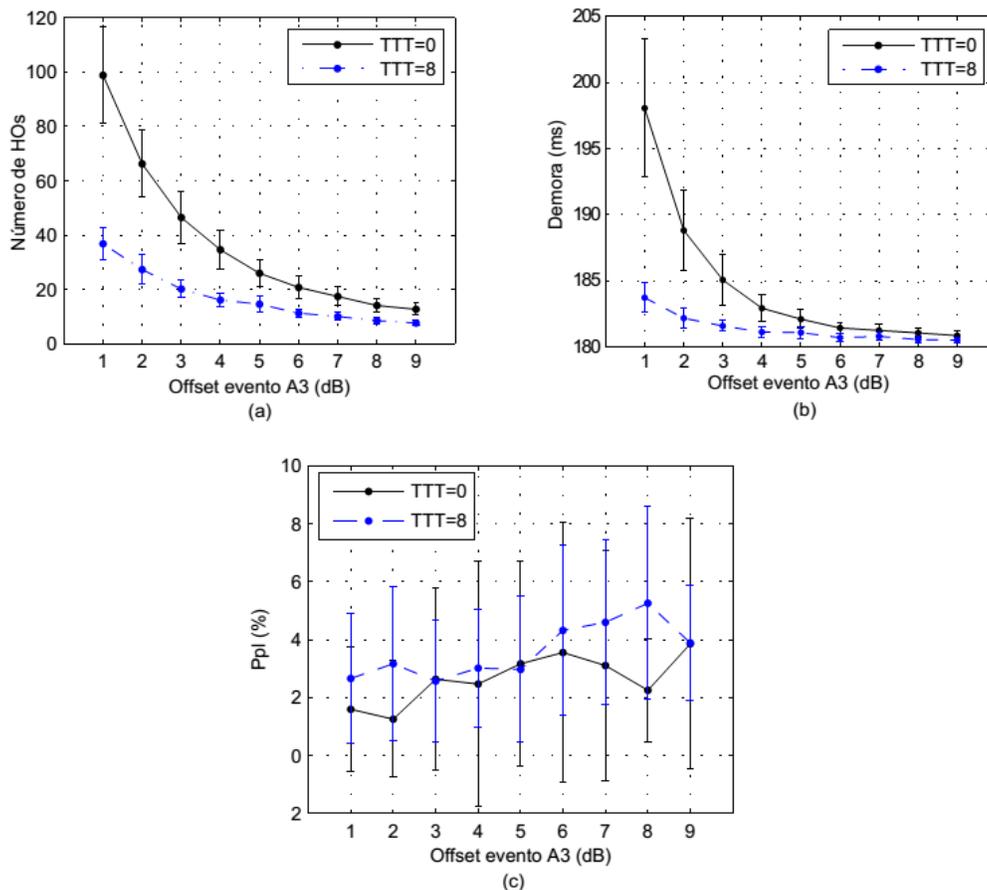


Figura 5: Resultados del experimento 1: (a) número de HOs; (b) demora MTE; (c) probabilidad de pérdida de paquetes

Resulta claro que aumentar el valor del offset y/o el valor de TTT disminuye el número de HOs. Disminuir el número de HOs tiene una repercusión positiva en cuanto a la demora experimentada por el flujo de datos. Sin embargo, también provoca que disminuya la calidad media de la señal en el terminal receptor, lo que puede afectar la Ppl. Con respecto al número de HOs aparece una relación de compromiso entre la demora y la pérdida de paquetes. En [22] se plantea que para servicios de voz la Ppl tiene un mayor impacto en la percepción de la calidad de la voz que la demora. Valores de demora por debajo de 200 ms apenas afectan el MOS (Mean Opinion Score) de la conversación. En la figura 5 (b) se muestra que la demora promedio de extremo a extremo se mantiene por debajo de los 200 ms, tanto para TTT=0 como para TTT=8. Por tanto, considerar solamente el comportamiento de la pérdida de paquetes puede ser una aproximación aceptable en este caso para evaluar la calidad percibida.

En la figura 5 (c) se muestra la Ppl para este experimento. Se puede observar que la Ppl tiende a aumentar a medida que aumenta el valor de *offset*, dado que el número de HOs disminuye. Esta tendencia es verificada también para un incremento del valor de TTT.

Debe señalarse que el número de eventos A3 iniciados es el mismo para cualquier valor de TTT. Sin embargo, en la medida en que TTT aumenta, la condición de salida (abandono) se satisface para un mayor número de esos eventos y el HO no se produce. Bajo estas condiciones, la calidad de la señal de la celda en servicio permanece alrededor de valores críticos un mayor por ciento del tiempo de la simulación. En la figura 6 se muestra el comportamiento de la SNR medida en el UE para los casos TTT=0 y TTT=8. La ocurrencia de un HO se representa mediante una línea vertical de color azul. Puede apreciarse que para TTT=0 ocurren varios HOs consecutivos en determinados instantes de la simulación. Este es el denominado efecto ping-pong. Para TTT=8, este efecto es menos marcado (prácticamente no existe), pero el tiempo que la SNR permanece alrededor de valores críticos se incrementa.

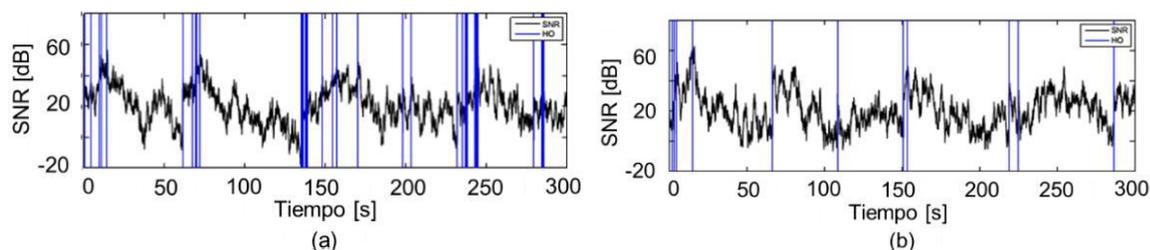


Figura 6: SNR en el UE: (a) TTT=0; (b) TTT=8

## Experimento 2

En este experimento se evalúa el impacto de la utilización de un valor de histéresis diferente de cero. Los valores de *offset* e *Hys* se varían de manera que la condición de entrada sea la misma, pero cambie la condición de salida del evento A3. Los valores de *offset* seleccionados son 5, 3.5, y 2.5 dB con sendos valores de histéresis de 0, 1.5, y 2.5 dB. El valor de *k* es 4 y la velocidad del UE es 120 km/h. Se realizan simulaciones para los diferentes valores de TTT. El tiempo de simulación es 300 s.

En la figura 7 (a) se muestra que para un valor de  $TTT=0$  el número de HOs para las tres combinaciones es aproximadamente el mismo que el valor obtenido en el experimento 1 para  $offset=5$  e  $Hys=0$ . Esto se debe a que como no existe  $TTT$  el evento es disparado inmediatamente cuando se cumple la condición de entrada. Al incrementarse el valor de  $TTT$  la tendencia es tener mayor cantidad de HOs mientras menor sea el valor de  $offset - Hys$  (condición de salida). Nótese que un incremento de  $TTT$  aumenta la probabilidad de ocurrencia de la condición de abandono para el evento A3. En la Fig. 7 (b) se muestra  $Ppl$  para este experimento. Se puede observar cómo su valor tiende a incrementar al aumentar  $TTT$  debido a la disminución del número de HOs. Asimismo, para un valor de  $TTT$  determinado  $Ppl$  es mayor mientras menor sea el valor de  $offset - Hys$ .

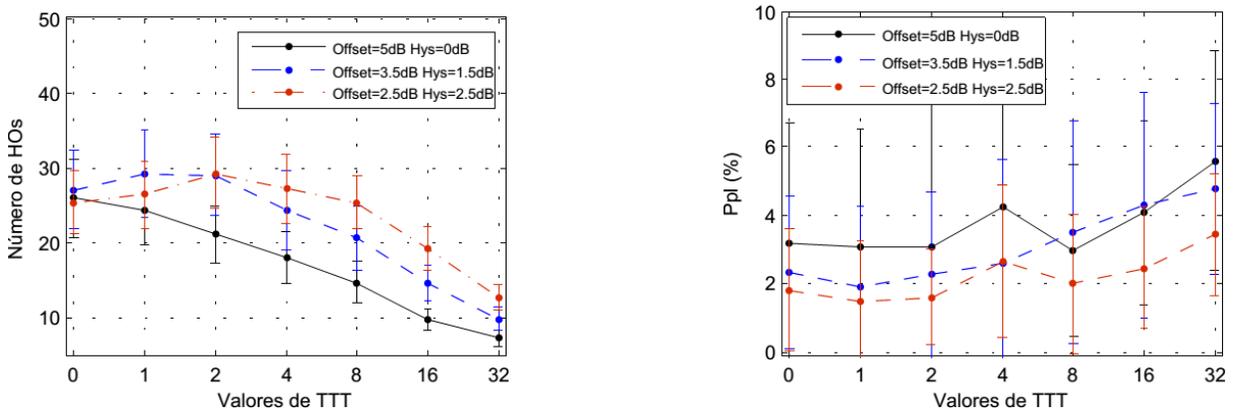


Figura 7: Resultados del experimento 2: (a) número de HOs; (b) probabilidad de pérdida de paquetes

En la figura 8 se muestran los resultados de la simulación. Para las tres velocidades en estudio, el número de HOs disminuye a medida que aumenta el valor de  $k$ . Este efecto es más notable para altas velocidades. La figura 8 (b) muestra la repercusión del número de HOs en la  $Ppl$ . Valores de  $k$  superiores a 8 provocan una  $Ppl$  que impacta negativamente en la calidad experimentada por usuarios de servicios de voz para las tres velocidades en estudio. Para las velocidades de 60 y 120 km/h un valor de  $k$  superior a 4 provoca  $Ppl$  demasiado altas para servicios de voz.

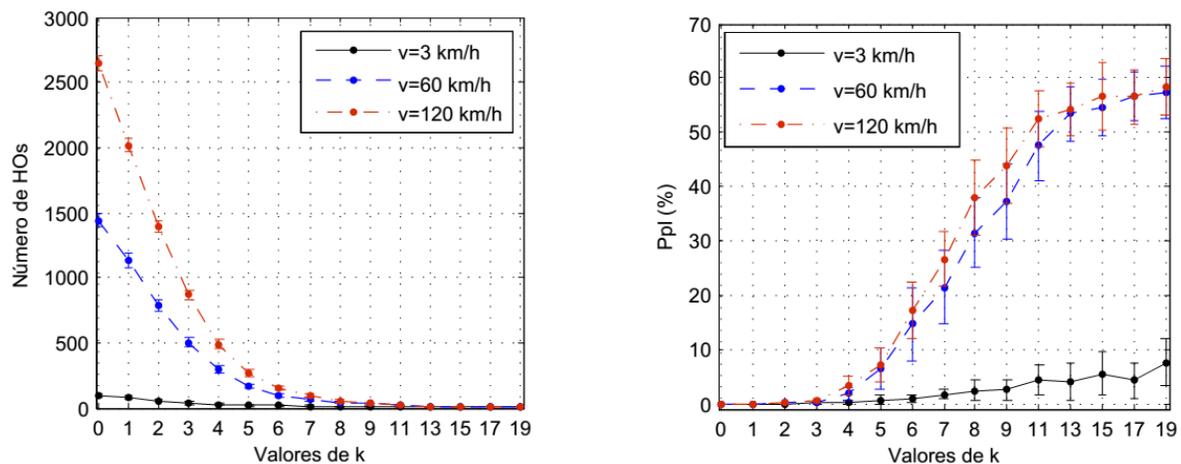


Figura 8: Resultados del experimento 3: (a) número de HOs; (b) probabilidad de pérdida de paquetes

### CONCLUSIONES.

En este trabajo se presentan los resultados de experimentos que permiten evaluar el impacto del ajuste de los parámetros presentes en reportes de evento A3 para el control de HO. El estudio permite estimar cómo afecta el ajuste de dichos parámetros el desempeño de redes LTE:

- Mientras menor sea el valor de *offset* + *Hys* más alta es la probabilidad de ocurrencia de HO y menor la probabilidad de pérdida de paquetes para un área con adecuada cobertura LTE. Por otra parte, aunque típicamente la pérdida de paquetes tiene un mayor impacto en la calidad de servicio, crecer arbitrariamente el número de HOs puede provocar demoras intolerables para servicios de voz. La condición de salida *offset* – *Hys* influye también en el número de HOs.
- El valor de TTT ayuda a evitar los HOs innecesarios que resultan de variaciones instantáneas de la señal. El ajuste del valor de TTT está influenciado por los valores de *offset* e *Hys*. Para valores bajos de *offset* + *Hys* conviene retardar el HO con un valor de TTT relativamente alto para evitar el exceso de HOs. Cuando la combinación *offset* + *Hys* es suficientemente alta entonces un valor bajo de TTT reporta mejores resultados.
- A medida que el valor de *k* aumenta disminuye el coeficiente *a* del filtro de capa 3. Las mediciones de la señal están más afectadas por la historia que por el valor instantáneo. En este caso se logra un mejor filtrado de las variaciones de la señal debido al desvanecimiento. De esta forma se evitan reportes que resulten de variaciones súbitas y momentáneas que produzcan efecto ping-pong. Existe una estrecha dependencia entre la velocidad, el valor de *k* y el número de HOs.

El valor de TTT ayuda a evitar los HOs innecesarios que resultan de variaciones instantáneas de la señal. El ajuste del valor de TTT está influenciado por los valores de *offset* e *Hys*. Para valores bajos de *offset* + *Hys* conviene retardar el HO con un valor de TTT relativamente alto para evitar el exceso de HOs. Cuando la combinación *offset* + *Hys* es suficientemente alta entonces un valor bajo de TTT reporta mejores resultados.

☒ A medida que el valor de *k* aumenta disminuye el coeficiente *a* del filtro de capa 3. Las mediciones de la señal están más afectadas por la historia que por el valor instantáneo. En este caso se logra un mejor filtrado de las variaciones de la señal debido al desvanecimiento. De esta forma se evitan reportes que resulten de variaciones súbitas y momentáneas que produzcan efecto *ping-pong*. Existe una estrecha dependencia entre la velocidad, el valor de *k* y el número de HOs.

## REFERENCIAS.

1. KHAN, F. *LTE for 4G mobile broadband: air interface technologies and performance*. Cambridge University Press, 2009.
2. SESIA, S.; TOUFIK, I.; BAKER, M. *LTE: the UMTS long term evolution*. Wiley Online Library, 2009.
3. JADHAV, S.; ZHANG, H.; HUANG, Z. "MOS-based handover protocol for next generation wireless networks". En *Advanced Information Networking and Applications (AINA), 2012 IEEE 26th International Conference on*, 2012, pp. 479-486.
4. JANSEN, T.; BALAN, I.; STEFANSKI, S.; MOERMAN, I.; KURNER, T. "Weighted performance based handover parameter optimization in LTE". En *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd*, 2011, pp. 1-5.
5. GE, H.; WEN, X.; ZHENG, W.; LU, Z.; WANG, B. "A history-based handover prediction for LTE systems". En *Computer Network and Multimedia Technology, 2009. CNMT 2009. International Symposium on*, 2009, pp. 1-4.
6. MUÑOZ, P.; BARCO, R.; DE LA BANDERA, I. "On the potential of handover parameter optimization for self-organizing networks". *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 2013, vol. 62, pp. 1895-1905.
7. LEGG, P.; HUI, G.; JOHANSSON, J. "A simulation study of LTE intra-frequency handover performance". En *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall)*, 2010 IEEE 72nd, 2010, pp. 1-5.
8. BAE, H.-D.; RYU, B.; PARK, N.-H. "Analysis of handover failures in LTE femtocell systems". En *Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference (ATNAC)*, 2011, pp. 1-5.
9. DIMOU, K. et al. "Handover within 3GPP LTE: design principles and performance". En *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall)*, 2009 IEEE 70th, 2009, pp. 1-5.
10. KIM, J.; LEE, G.; P., H. "Adaptive Time-to-Trigger Scheme for Optimizing LTE Handover". *International Journal of Control & Automation*, 2014, vol. 7.
11. CHAPARRO-MARROQUÍN, J. C. "Comparison between measurement events for LTE handover in rural and urban scenarios involving femto-cell deployment". En *Latest trends on communication*, pp. 165-170.
12. LEE, H. J.; KIM, J. H. "A Handover Mechanism Considering the Abstracted R-Factor". *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 2014, vol. 63, pp. 2687-2696.
13. LIN, C. C. "Handover Mechanisms in 3GPP Long Term Evolution (LTE)". Tesis de Doctorado, University of Technology, Sydney, 2013.

14. POIKSELKÄ, M.; HOLMA, H.; HONGISTO, J.; KALLIO, J.; TOSKALA, A. *Voice over LTE (VoLTE)*. John Wiley & Sons, 2012.
15. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification (Rel. 12), 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Sophia-Antipolis, France, Dec. 2014.
16. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for support of radio resource management (Rel. 12), 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Sophia-Antipolis, France, Dec. 2014.
17. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Rel. 9), 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Sophia-Antipolis, France, Mar. 2010. 13
18. M. Series. "Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced". Report ITU, 2009, pp. 2135-1.
19. GUDMUNDSON, M. "Correlation model for shadow fading in mobile radio systems". *Electronics letters*, 1991, vol. 27, pp. 2145-2146.
20. CHU, X.; LOPEZ-PEREZ, D.; YANG, Y.; GUNNARSSON, F. *Heterogeneous Cellular Networks: Theory, Simulation and Deployment*. Cambridge University Press, 2013.
21. UIT-T P.59: "Calidad de transmisión telefónica. Aparatos para mediciones objetivas. Habla conversacional artificial". 1993.
22. SENGUPTA, S.; CHATTERJEE, M.; GANGULY, S. "Improving quality of VoIP streams over WiMax". *Computers, IEEE Transactions on*, 2008, vol. 57, pp. 145-156.