



Adaptación de parámetros de *handover* para reducir transferencias de conexión erróneas en redes inalámbricas heterogéneas de nueva generación

Adapting *handover* parameters for reducing failed connection transfers in next generation heterogeneous wireless networks

Recibido: 18 de agosto de 2015 ; aceptado: 19 de octubre de 2015

Enrique René Bastidas Puga¹, Guillermo Galaviz Yáñez², Ángel Gabriel Andrade Reátiga³

Universidad Autónoma de Baja California

Resumen

Un objetivo de los sistemas de comunicación móvil de Quinta Generación (5G), es atender el creciente volumen de usuarios y el tráfico de datos. El despliegue de redes heterogéneas (HetNet) es una opción que incrementa la capacidad de estos sistemas, pero también la cantidad de procesos de transferencia de servicio (*handover*) y, con ello, el número de fallas de *handover* y de *handovers ping-pong*. Para reducir estas fallas, que deterioran la calidad de servicio de la HetNet, en este trabajo se propone adaptar los parámetros que disparan un *handover*, tiempo-para-disparo (TTT) y margen-de-*handover* (HOM), en función de la relación señal-ruido-interferencia (SINR). Evaluaciones numéricas muestran que las tasas de fallas de *handover* y de *handovers ping-pong* se reducen simultáneamente al adaptar el TTT y HOM con un conocimiento perfecto de valores futuros de SINR, contrario al caso cuando se mantienen constantes, en el que se presenta un compromiso entre ambas fallas.

Palabras clave: Transferencia de conexión, red heterogénea (HetNet), sistema de comunicación 5G, predicción de SINR.

Abstract

One of the objectives concerning fifth generation (5G) communication systems is tending to the growing amounts of user and the mobile data. The deployment of heterogeneous networks (HetNet) is an option to increase the capacity of these systems, but it also increases the amount of connection transfers (*handovers*), as well as the quantity of *handover* failures and *ping-pong handovers*. To reduce these failures, that deteriorate the network quality of service, a method is proposed in order to adapt the parameters that control the *handover* starting time, time-to-trigger (TTT) and *handover*-margin (HOM), based on the signal-to-interference-noise ratio (SINR). Numerical evaluations show a simultaneous reduction of the *handover* failure rate and the *ping-pong handover* rate for the proposed method with a perfect knowledge of future sinr values, as opposed to a *handover* procedure with constant parameters, which presents a tradeoff among both failures.

Keywords: Handover, heterogeneous network (HetNet), 5G communication systems, sinr prediction.

INTRODUCCIÓN

Una de las visiones propuestas sobre los sistemas de comunicación móvil de 5G (Quinta Generación), es la de ofrecer nuevos servicios de banda ancha móvil con características deseables para la transmisión de video de ultra alta definición (UHD) o en 3D; también se incluye en

estas propuestas, la comunicación ultra confiable de bajo retardo como las que requieren vehículos autónomos o ciertos procesos de automatización industrial, sin dejar de mencionar el control automático de la seguridad, iluminación, aire acondicionado y humedad, en oficinas y

¹ Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería electrónica (telecomunicaciones). Profesor e investigador en la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Facultad de Ingeniería Mexicali. Línea de investigación: Gestión de movilidad en redes heterogéneas de sistemas de comunicaciones móviles. Correo electrónico: rbastidas@uabc.edu.mx

² Doctor en Ciencias en electrónica y telecomunicaciones. Profesor e investigador en la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Facultad de Ingeniería Mexicali. Línea de investigación: Despacho de recursos espectrales en sistemas de comunicaciones móviles. Correo electrónico: ggalaviz@uabc.edu.mx.

³ Doctor en Ciencias en electrónica y telecomunicaciones. Profesor e investigador en la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Facultad de Ingeniería Mexicali. Línea de investigación: Detección y asignación de espectro radioeléctrico en redes inalámbricas heterogéneas. Correo electrónico: aandrade@uabc.edu.mx

hogares (Tiedemann, 2015).

Por lo anterior, se estima que para 2020 tanto el tráfico de señales de datos como el de control se incrementarán por un factor de 100 en comparación con el tráfico de 2010 (Andrews *et al.*, 2014). Y, aunado a una aparente “escasez” de espectro radioeléctrico, es necesario introducir mecanismos que les permitan a las redes de comunicaciones móviles de nueva generación incrementar su capacidad efectiva en el uso del espectro y la de ofrecer nuevas aplicaciones y servicios demandantes de calidad de servicio.

Entre los principales avances tecnológicos que se reportan para incrementar la eficiencia espectral de los sistemas móviles se encuentra la radio cognoscitiva (Akyildiz, 2006), la transmisión y recepción de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) masiva (Wang *et al.*, 2014) y el despliegue de redes heterogéneas (HetNets) (Andrews *et al.*, 2014). El presente trabajo se contextualiza en la propuesta de utilizar Redes Heterogéneas, ya que formarán parte de la arquitectura de los sistemas 5G (Wang *et al.*, 2014) como una solución para reciclar eficientemente el espectro radioeléctrico.

Una “HetNet” está formada principalmente por una combinación de macroceldas y celdas de menor tamaño (picoceldas o femtoceldas) que comparten zonas de cobertura (Damjanovic *et al.*, 2011), opcionalmente utilizan la misma tecnología de acceso de radio y, en conjunto, incrementan la cobertura y tasa de transmisión del usuario final (Wang *et al.*, 2014).

A medida que una HetNet se vuelva progresivamente más densa y heterogénea (esto es, que exista una mayor cantidad de celdas de distintos tamaños por unidad de área) será más complejo gestionar con éxito la movilidad del usuario, ya que se incrementará la probabilidad de que un usuario cambie de una celda a otra (3GPP, 2012c; López-Pérez, Guvenc y Chu, 2012).

Para evitar la interrupción del servicio de comunicación del usuario, ocasionado por su desplazamiento entre las distintas zonas de cobertura, la red debe transferir la conexión del nodo fuente (o estación base fuente) a un nodo destino (estación base destino). A este proceso se le conoce como “traspaso” o “handover”, y se realiza de forma transparente al usuario, de modo que las transiciones entre una celda y otra deben ser lo suficientemente rápidas para que no sean percibidas por los usuarios (López-Pérez *et al.*, 2012)).

Durante el *handover*, el usuario se desconecta primero de su nodo fuente, y en un tiempo corto (en el orden de los milisegundos) establece un nuevo enlace de comunicación con un nodo destino. Sin embargo, si durante este procedimiento, la calidad del canal entre usuario y nodo fuente disminuye por debajo de un umbral específico, el proceso de *handover* se interrumpirá ocasionando lo que se conoce como una “falla de *handover*” (López-Pérez, Guvenc y Chu, 2012). De manera adicional, aun cuando el usuario presente poca movilidad entre las zonas de cobertura, es posible que se inicien procedimientos de *handover* indeseados debido a las variaciones de potencia en el canal inalámbrico. Si un usuario se conecta a un nodo destino y en poco tiempo completa un segundo *handover* con su nodo fuente anterior, se produce lo que se conoce como un “*handover ping-pong*” (López-Pérez, Guvenc y Chu, 2012). Las fallas de *handover* y los *handovers ping-pong*, además de que interrumpen la comunicación, generan una elevada e innecesaria carga de señalización en la red, debido al intercambio continuo de señales de control entre el usuario, el nodo fuente y el nodo destino para recuperar el servicio del usuario.

Una estrategia que reduce las fallas de *handover* y los *handovers ping-pong* es modificar el tiempo de inicio del *handover* (ya sea retrasándolo o adelantándolo). Retrasarlo, implica que tardará en completarse, y consecuentemente aumentará la probabilidad de que se presente una falla, pero reducirá los *handovers ping-pong*. Lo contrario sucede si el *handover* inicia anticipadamente (López-Pérez, Guvenc y Chu, 2012).

El instante en el que debe iniciar el *handover* se controla con los parámetros “tiempo de disparo” (TTT) y “margen de *handover*” (HOM) (López-Pérez, Guvenc y Chu, 2012). Algunos autores proponen que estos deben adaptarse en lugar de que la red los considere constantes como convencionalmente se realiza. Esta adaptación puede ser en función de la *tasa de fallas de handover* (Muñoz, Barco y Bandera, 2013), o con base en las características de los nodos involucrados en el *handover* (Gao *et al.*, 2013), incluso también de acuerdo con las características del entorno de propagación, medido en términos de la Razón Señal a Ruido Interferencia (SINR) (Bastidas-Puga, Galaviz y Andrade, 2015).

Una falla de *handover* ocurre porque la calidad de la señal recibida, medida en términos del SINR, se encuentra por debajo de un nivel específico (3GPP, 2012c). Si se

conoce con precisión el instante de tiempo en el que el valor de SINR estará por debajo de dicho umbral, entonces es posible adaptar el HOM y TTT a ese tiempo para retrasar el inicio del *handover*. Este tiempo que retrasa el inicio de la transferencia de conexión, es el tiempo máximo que evitará que falle, y a su vez, reducirá la probabilidad de que ocurra un *handover ping-pong*.

En este trabajo se propone un método para adaptar el HOM y el TTT a las condiciones del enlace de radio, con lo que se logra retrasar el inicio del *handover* tanto como sea posible. Los resultados muestran que al adaptar el TTT y HOM con un conocimiento perfecto de los valores futuros de SINR, es posible reducir tanto la *tasa de fallas de handover* como la *tasa de handovers ping-pong*, contrario al caso cuando se utiliza un procedimiento de *handover* con parámetros constantes, en el que se presenta un compromiso entre ambas tasas. El método que se propone en este trabajo para adaptar HOM y TTT presenta la ventaja de que no es necesario modificar el actual procedimiento estandarizado de *handover* (3GPP, 2012a) para su implementación.

El resto de este documento se encuentra organizado de la siguiente manera: Para comprender las particularidades del proceso de traspaso de conexión, en la segunda sección se describe el procedimiento de *handover* y el efecto que produce el canal inalámbrico sobre el procedimiento. El método de adaptación propuesto para HOM y TTT se describe en la tercera sección. En la cuarta sección se presentan las condiciones de evaluación, así como el análisis numérico de los resultados, y finalmente, en la última sección se incluyen las conclusiones.

DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE HANDOVER

El nodo fuente inicia el traspaso si, durante un tiempo TTT, la potencia que recibe el usuario de algún nodo destino ($RSRP_t$) es mayor que la potencia que recibe del nodo fuente ($RSRP_s$) más el HOM, como se muestra en (1) (3GPP, 2013).

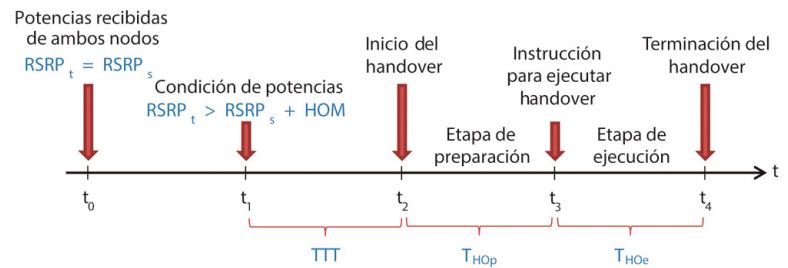
$$RSRP_t > RSRP_s + HOM. \quad (1)$$

La figura 1 muestra el diagrama de los tiempos involucrados en el procedimiento de traspaso. Si el usuario se aleja de su nodo fuente, el nivel de $RSRP_s$ disminuye en función de la distancia y, debido a que el usuario se

acerca a otro nodo destino, el nivel de $RSRP_t$ aumenta. El instante t_0 representa el tiempo en el que $RSRP_t = RSRP_s$, y sirve como referencia para medir el retardo (o adelanto) del inicio del *handover*, mientras que t_1 es el instante en el que se satisface por primera vez la condición (1). El parámetro HOM determina el tiempo que transcurre entre t_0 y t_1 para $RSRP_t$ y $RSRP_s$ dadas. A partir de t_1 se mide el tiempo en el que se mantiene la condición (1) y, si esto sucede durante TTT segundos, el nodo fuente inicia el *handover* en el tiempo t_2 (3GPP, 2013).

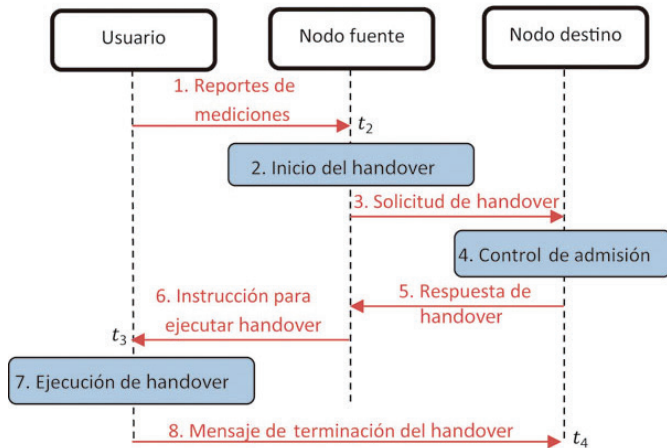
La “etapa de preparación” del traspaso, que se observa en la figura 1, inicia en t_2 y su duración es T_{HOp} segundos. En esta etapa se realiza el intercambio de señales de control entre el nodo fuente, el nodo destino y el usuario, como se muestra en el diagrama de secuencia de la figura 2 (pasos 2 a 6). Posteriormente, en el tiempo t_3 el usuario recibe del nodo fuente la “instrucción para ejecutar el *handover*” e inicia la “etapa de ejecución” con duración T_{HOe} segundos. Durante la “etapa de ejecución”, el usuario se desconecta del nodo fuente y se conecta al nodo destino. Esta etapa concluye en el tiempo t_4 , cuando el nodo destino recibe del usuario el mensaje “terminación del *handover*” (3GPP, 2012a), lo que significa que el *handover* tuvo éxito y a partir de ese instante el usuario mantiene su servicio a través del nuevo nodo.

Figura 1. Diagrama de tiempos del *handover*



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Procedimiento de handover



Fuente: elaboración propia con base en (3GPP, 2012a).

Efecto del canal en el procedimiento de handover

El valor de SINR que percibe un usuario que se aleja de su nodo fuente se reduce debido a las pérdidas por propagación que sufre la señal con respecto a la distancia. Durante el procedimiento de handover, si el nivel de SINR que experimenta el enlace de comunicación entre usuario y nodo fuente ($SINR_s$) es menor al nivel de SINR mínimo necesario para mantener la comunicación ($SINR_{out}$), entonces se generará una falla de handover. La falla de handover ocurre si alguna de las siguientes condiciones se cumple (3GPP, 2012c):

Si el $SINR_s$ que percibe el usuario es menor que el SINR en el instante en el que el usuario recibe del nodo fuente el mensaje “instrucción para ejecutar handover” (instante t_3 en la figura 1). Lo anterior interrumpe la comunicación y evita que el usuario reciba la instrucción para ejecutar el traspaso.

Si el usuario se encuentra en un estado de comunicación “no activa” debido a una falla del enlace de radio (RLF) entre los tiempos t_1 y t_3 (ver figura 1). Esto ocurre si el $SINR_s$ se mantiene por debajo del $SINR_{out}$ durante un tiempo predefinido para declarar la rlf (3GPP, 2013).

Si el SINR del nodo destino ($SINR_d$) que percibe el usuario es menor que el $SINR_{out}$ cuando el nodo destino recibe del usuario el mensaje “terminación del handover” (instante t_4 en la figura 1). Lo anterior evita que el nodo destino tome el control del servicio de comunicación del usuario.

El tiempo del que dispone la red para completar exi-

tosamente el handover depende de la rapidez con que disminuya el $SINR_s$ hasta llegar al nivel $SINR_{out}$. Entre más rápido sea esta reducción, la red dispone de menos tiempo para evitar la falla de handover. Para evitar que se cumpla la condición $SINR_s < SINR_{out}$ y ocurra una falla de handover, es necesario adelantar el inicio del handover para que el sistema cuente con el tiempo suficiente para completarlo.

Por otro lado, el handover ping-pong se presenta cuando, una vez completado el handover, el usuario se desconecta del nodo destino al que se conectó y se conecta nuevamente a su nodo fuente anterior en un tiempo menor a un tiempo de estancia (3GPP, 2012c). El tiempo de estancia se considera desde el instante en que el nodo fuente recibe del usuario el mensaje “terminación del handover” (t_4 en la figura 1) hasta el instante que otro nodo destino recibe del usuario un nuevo mensaje “terminación del handover”. El tiempo mínimo de estancia lo define el operador de la red (3GPP, 2012c), y en este trabajo se considera un tiempo de estancia estándar de 2 segundos.

Los traspasos ping-pong se generan debido a que el usuario se ubica en la frontera de las celdas y las fluctuaciones de las potencias que recibe desde distintos nodos provocan que la condición (1) se satisfaga repetidamente. Para evitar el incremento en la tasa de handovers ping-pong, es necesario retrasar el inicio del handover y detectar, con suficiente tiempo, las variaciones temporales de potencia que provocan que se cumpla (1).

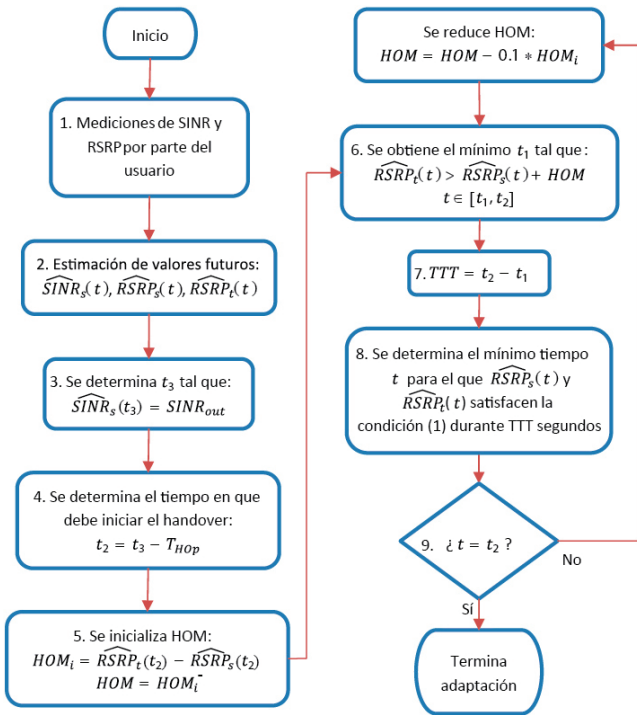
Utilizar valores constantes de HOM y TTT adelanta o retrasa el inicio de handover, lo que genera un compromiso entre las tasas de fallas de handover y handover ping-pong (López-Pérez et al., 2012). Por lo anterior, en este trabajo se propone adaptar el HOM y el TTT con base en las estimaciones de valores futuros del valor instantáneo de SINR, para reducir tanto la probabilidad de ocurrencia de fallas de handover como la de handover ping-pong.

Proceso de adaptación del HOM y TTT en función del SINR

Para adaptar los valores de HOM y TTT al nivel de SINR, es necesario contar con estimaciones de valores futuros de $SINR_s$, $RSRP_s$ y $RSRP_t$, las cuales se definen respectivamente como $SINR_s(t)$, $RSRP_s(t)$ y $RSRP_t(t)$.

En la figura 3 se presenta el algoritmo de adaptación de HOM y TTT, cuyos pasos se describen a continuación:

Figura 3. Algoritmo de adaptación de HOM y TTT



Fuente: elaboración propia.

1) El usuario realiza mediciones periódicas de los niveles de RSRPs, $RSRP_t$ y $SINR_s$ (3GPP, 2012b). En este trabajo $RSRP_s$, $RSRP_t$ y $SINR_s$ se simulan con las expresiones (2), (3) y (4) respectivamente.

$$RSRP_s(t) = P_{tx-A} - PL[d(t)]. \quad (2)$$

$$RSRP_t(t) = P_{tx-B} - PL[D-d(t)]. \quad (3)$$

$$SINR_s(t) = RSRP_s(t) - RSRP_s(t_0) + SINR_s(t_0). \quad (4)$$

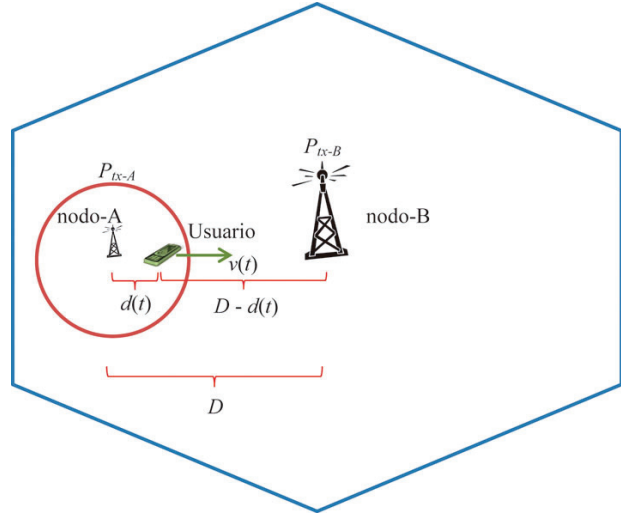
Donde:

$$PL[d(t)] = 22 \log_{10}[d(t)] + 28 + 20 \log_{10}(f_c) + X(\mu, \sigma).$$

P_{tx-A} y P_{tx-B} son las potencias de transmisión⁽⁵⁾ (en dBm) de los nodos A y B respectivamente representados en la figura 4, D es la distancia entre nodos, PL representa las pérdidas por propagación (ITU, 2008), $d(t)$ es la distancia entre el usuario y el nodo fuente (nodo-A) en el tiempo t (ver figura 4), f_c es la frecuencia de la portadora en GHz y X es una variable aleatoria normal con media 0 dB y desviación estándar σ dB que representa los desva-

necimientos por sombreado en el canal. La aleatoriedad de $SINR_s$ en (4) en cualquier periodo t depende de la variable aleatoria $SINR_s(t_0)$, que en este caso presenta una distribución uniforme entre $[-3,0]$ (dB), y de la variable aleatoria X que representa los desvanecimientos por sombreado del canal.

Figura 4. Escenario de handover de celda pequeña a macrocelda



Fuente: elaboración propia.

2) Con el fin de evaluar la capacidad del método propuesto de reducir la tasa de fallas de handover y la tasa de handovers ping-pong sin que este se vea afectado por un error de predicción, en este trabajo se considera un conocimiento perfecto del canal, es decir, que $RSRP_s(t)$, $RSRP_t(t)$ y $SINR_s(t)$ predicen exactamente los valores medidos de $RSRP_s$, $RSRP_t$ y $SINR_s$.

3) Los valores de $SINR_s(t)$ se utilizan para predecir el tiempo t_3 (ver figura 1) en el que se debe cumplir la condición $SINR_s(t_3) = SINR_{out}$. Este es el tiempo máximo en el que el usuario puede recibir el mensaje “instrucción para ejecutar handover” sin que ocurra una falla de handover.

4) A partir de t_3 se estima el instante $t_2 = t_3 - T_{Hop}$ apropiado para que inicie el handover, donde T_{Hop} es el tiempo que requiere la red para preparar el handover.

5) Los valores de HOM y TTT se modifican para que el handover inicie en t_2 . Así, el parámetro HOM toma

como valor inicial (HOM_i) la diferencia entre $RSRP_t(t_2)$ y $RSRP_s(t_2)$. HOM_i es el valor máximo para el que $RSRP_t(t_2)$ y $RSRP_s(t_2)$ satisfagan (1), y se considera de esta manera para retardar lo más posible el inicio del traspaso y reducir la probabilidad de que inicie antes de t_2 .

6) Se determina el mínimo valor de t_1 para que $RSRP_t(t)$ y $RSRP_s(t)$ satisfagan la condición (1) en el intervalo $[t_1, t_2]$.

7) El valor TTT adaptado corresponde al tiempo que transcurrirá entre los instantes t_1 y t_2 .

8) En este punto, los valores adaptados de HOM y TTT aseguran que la condición (1) se satisfaga entre t_1 y t_2 , sin embargo, debido a las variaciones aleatorias de $RSRP_t(t)$ y $RSRP_s(t)$ es posible que (1) se satisfaga entre t_0 y t_1 , lo que provocaría que el *handover* inicie anticipadamente. Por lo que se determina el mínimo valor de t para que $RSRP_t(t)$ y $RSRP_s(t)$ satisfagan (1) durante TTT segundos.

9) Si $t = t_2$ entonces el proceso de adaptación de HOM y TTT se da por concluido y el *handover* iniciará en el tiempo t_2 calculado en el paso 4. En caso contrario, se reduce el valor de HOM en decrementos de 10% de HOM_i y después se repite el proceso a partir del paso 6.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado, se presenta la evaluación del proceso de gestión de movilidad medido en términos de la *tasa de fallas de handover* y la *tasa de handovers ping-pong*. Para lo anterior, se considera el método propuesto para adaptar los valores de TTT y HOM, y los resultados se comparan con un escenario en el que se emplean valores constantes de HOM y TTT.

Escenario de evaluación

El escenario de evaluación, como se muestra en la figura 4, consta de una HetNet formada por una macrocelda, una celda pequeña y un usuario que se ubica inicialmente en el mismo punto del área de servicio de la celda pequeña (nodo-A). El usuario se desplaza en línea recta con velocidad constante hacia la macrocelda (nodo-B).

A partir de P_{tx-A} , P_{tx-B} , $d(t)$, y de $PL[d(t)]$, cada T_m segundos se estiman los valores que percibe el usuario de $RSRP_s$, $RSRP_t$ y $SINR_s$, de acuerdo con (2), (3) y (4) respectivamente.

Cada uno de los tiempos involucrados en el procedimiento del *handover* desde t_0 hasta t_4 , se determinan siguiendo el procedimiento de la sección II.

Una vez que el *handover* inició en t_2 , este se contabilizará como exitoso si en t_4 se cumple la condición $SINR_t(t_4) \geq SINR_{out}$. En caso contrario, se contabilizará como una falla de *handover*, y además, si se presenta una falla de enlace de radio, ($SINR_s(t) < SINR_{out}$), entre t_1 y t_3 también se considera como una falla de *handover*. Finalmente, se cuenta un *handover ping-pong*, si para un mismo usuario se producen dos *handovers* consecutivos en un tiempo menor a un tiempo mínimo de estancia.

Durante la evaluación de la propuesta, se supone que el nodo destino siempre tiene recursos para aceptar el *handover*, ya que la falta de estos producirá una falla de *handover* independientemente de que los parámetros HOM y TTT sean constantes o adaptados.

La tasa de fallas de *handover* se obtiene de la proporción de fallas de *handover* con respecto al total de *handovers* que inician en la HetNet, mientras que la tasa de *handovers ping-pong* se obtiene de la proporción de *handovers ping-pong* con respecto al total de *handovers* que se completan exitosamente.

En el escenario descrito en la figura 4, aun cuando el usuario sigue la misma trayectoria, las variaciones de RSRP y SINR son aleatorias, ya que la condición del canal inalámbrico depende de las pérdidas por propagación con desvanecimiento.

Resultados de la evaluación con valores constantes de HOM y TTT

En esta subsección se presentan los resultados de la *tasa de fallas de handover* y de la *tasa de handovers ping-pong* para el caso en el que se utilizan valores constantes de HOM y TTT, con las condiciones de evaluación descritas en la subsección anterior y los parámetros de simulación que se muestran en la tabla 1 (3GPP, 2012c). El algoritmo de simulación se programó en Matlab y se ejecutó en una estación de trabajo HP Z620 con procesador Intel® Xeon® CPU E5-1620 v2 de 3.70 GHz.

Cada experimento descrito en la subsección anterior se

ejecuta $N = 24,000$. Este número permite que los intervalos de confianza de 95% de los valores estimados tanto de la tasa de fallas de *handover* como de la tasa de *handovers ping-pong*, mantengan a partir de la tasa correspondiente, un rango máximo de $\pm 10\%$ del valor absoluto de esa tasa. Por ejemplo: para una tasa de 1%, el intervalo de confianza de 95% será como máximo [0.9, 1.1] (%).

Las tablas 2 y 3 presentan el porcentaje de la *tasa de fallas de handover* y de la *tasa de handovers ping-pong* respectivamente.

Tabla 1. Parámetros de simulación

Parámetro	Valor
Potencia de transmisión nodo fuente (P_{tx-A})	30 (dBm)
Potencia de transmisión nodo destino (P_{tx-B})	46 (dBm)
Frecuencia (f_c)	2 (GHz)
Distancia entre nodos (D)	175 (m)
Desviación estándar del desvanecimiento (σ)	4 (dB)
Distancia de correlación del desvanecimiento (d_{corr})	25 (m)
Velocidades del usuario [$v(t)$]	[3,10,30,60, 100,120] (km/h)
Número de veces que se repite la simulación (N)	24,000
Período de mediciones del usuario (T_m)	10 (ms)
Mínimo tiempo de estancia	2 (s)
Nivel de falla de <i>handover</i> ($SINR_{out}$)	-8 (dB)
Tiempo para declarar falla de enlace de radio	1 (s)
$(SINR_s)(t_0)$	$\sim U[-3, 0]$ (dB)
Tiempo de preparación de <i>handover</i> (T_{Hop})	50 (ms)
Tiempo de ejecución de <i>handover</i> (T_{Hoe})	40 (ms)
Margen de <i>handover</i> (HOM) sin adaptar	[1, 2, 3, 4] (dB)
Tiempo para disparo (TTT) sin adaptar	[40, 240, 440, 640] (ms)

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Tasa de fallas de *handover* (%) con valores constantes de HOM y TTT

HOM (dB)	TTT (ms)			
	40	240	440	640
1	1.50	9.99	20.00	27.53
2	3.19	15.79	26.07	33.79
3	6.57	22.00	33.17	40.26
4	12.61	30.41	40.13	47.42

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Tasa de *handovers ping-pong* (%) con valores constantes de HOM y TTT

HOM (dB)	TTT (ms)			
	40	240	440	640
1	19.69	3.54	1.29	0.48
2	4.64	0.47	0.21	0.02
3	1.22	0.09	0.00	0.00
4	0.11	0.02	0.00	0.00

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 2 se puede observar que es posible obtener una *tasa de fallas de handover* de 1.50% para el caso cuando el $HOM=1$ dB y el $TTT=40$ ms, es decir, del total de *handovers* que inician, 1.50% se consideraron como fallas. Estos son los mínimos valores de HOM y TTT considerados durante la simulación que provocan el máximo adelanto del *handover* y la menor *tasa de fallas de handover*, aunque, como se observa en la tabla 3, producen la mayor *tasa de handovers ping-pong* (19.69%), lo que significa que del total de *handovers* que se completan con éxito, el 19.69% corresponden a *handovers ping-pong*.

También se observa en las tablas 2 y 3 que si se incrementan los valores de HOM o TTT (provocando un retraso del *handover*) se reduce la *tasa de handovers ping-pong*, pero se incrementa la *tasa de fallas de handover*.

Estos resultados establecen que existe un compromiso entre la *tasa de fallas de handover* y la *tasa de handovers ping-pong*, cuando se utilizan valores constantes de los parámetros HOM y TTT como se indica en López-Pérez, Guvenc y Chu (2012). Valores pequeños de HOM y TTT (1 dB y 40 ms respectivamente) adelantan el inicio del *handover* y reducen la *tasa de fallas de handover*, pero incrementan la *tasa de handovers ping-pong*, mientras que valores grandes de HOM y TTT (4 dB y 640 ms respectivamente) retrasan el inicio del *handover* incrementando la *tasa de fallas de handover* y reduciendo la *tasa de handovers ping-pong*.

En la siguiente subsección se analiza el desempeño del procedimiento de *handover* en la HetNet, considerando el caso en el que los parámetros *HOM* y *TTT* se adaptan al nivel de *SINR_s*.

Resultados con adaptación de *HOM* y *TTT* considerando una estimación perfecta de valores futuros de *SINR*

Los resultados de la *tasa de fallas de handover* y la *tasa de handovers ping-pong* que se presenta en esta subsección, corresponden a las mismas condiciones de evaluación descritas en la sección anterior, con los parámetros de simulación de la tabla 1, pero los valores de *HOM* y *TTT* se adaptan con el algoritmo que se muestra en la figura 3.

En la tabla 4 se observa que cuando se utiliza valores de *HOM* y *TTT* variables con respecto al *SINR*, se obtiene una *tasa de fallas de handover* del 0.89% y una *tasa de handovers ping-pong* de 1.93%.

De acuerdo con los resultados de la tabla 2, la menor *tasa de fallas de handover* (1.50%) ocurre cuando *HOM*=1 dB y *TTT*=40 ms, y, de acuerdo a la tabla 3, con estos mismos valores de *HOM* y *TTT* se obtiene la mayor *tasa de handovers ping-pong* (19.69%). Siguiendo esta tendencia, utilizar valores constantes de *HOM* y *TTT* para reducir la *tasa de fallas de handover* por debajo del 1.50%, compromete a que la *tasa de handovers ping-pong* se incremente por arriba de 19.69%. Pero si se comparan estos resultados con los que se presentan en la tabla 4, se observa que existe una reducción relativa de 40.7% para la *tasa de fallas de handover* y de 90.2% para la *tasa de handovers ping-pong* cuando se adaptan los parámetros *HOM* y *TTT* a las condiciones del entorno de propagación: Es decir, indica que es posible reducir simultáneamente ambas tasas con el método propuesto.

Tabla 4. Tasa de fallas de *handover* y tasa de *handovers ping-pong* con valores adaptados de *HOM* y *TTT*

	Predicción de <i>SINR</i> libre de error
Tasa de fallas de <i>handover</i> (%)	0.89
Tasa de <i>handovers ping-pong</i> (%)	1.93

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un método para la adaptación de los parámetros tiempo para disparo (*TTT*) y margen de *handover* (*HOM*), con base en los valores futuros de *SINR*. El método adapta el *TTT* y el *HOM* para retrasar el tiempo de inicio de la transferencia de conexión tanto como sea posible. Los resultados muestran que el método propuesto reduce tanto la *tasa de fallas de handover* como la *tasa de handovers ping-pong* si se tiene conocimiento perfecto de los valores futuros de *SINR*, contrario a un procedimiento de *handover* con parámetros sin adaptar, para el que se establece que reducir la *tasa de fallas de handover* implica que la *tasa de handovers ping-pong* se incremente.

Para estimar valores futuros de *SINR* se requiere un modelo de predicción, pero en la práctica no es posible contar con un modelo de predicción de *SINR* que estime perfectamente valores futuros de *SINR*, por lo que para continuar este trabajo de investigación, se propone diseñar un modelo de predicción del *SINR* en el que exista el mínimo error de predicción entre las estimaciones o pronósticos de valores futuros y los datos históricos observados.

REFERENCIAS

3GPP (2012a). Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Overall description; Stage 2 (Release 11). *Technical Specification, TS 36.300 v11.3.0*.

3GPP (2012b). Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer measurements (Release 11). *Technical Specification TS, 36.214 V11.1.0*.

3GPP (2012c). Mobility Enhancements in Heterogeneous Networks. *Technical Report TS, 36.839 v11.1.0*.

3GPP (2013). Radio Resource Control (RCC); Protocol Specification (Release 11). *Technical Specification TS, 36.331 V11.6.0*.

Akyildiz, I. (2006). Next generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless. *Computer Networks*, 2127-2159.

Andrews, J., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S., Lozano, A.,

- Soong, A., *et al.* (2014). What will 5G be? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1065-1082.
- Bastidas-Puga, E., Galaviz, G., y Andrade, A. (2015). *Handover* parameter adaptation based on SINR reduction rate for 5G heterogeneous networks. Wireless Innovation Conference on Wireless Communications Technologies and Software Defined Radio (WinnComm).
- Damnjanovic, A., Montojo, J., Yongbin, W., Tingfang, J., Tao, L., Vajapeyam, M., Taesang, Y., Osok S., y Malladi, D. (2011). A survey on 3GPP heterogeneous networks. *IEEE Wireless Communications*, 20-21.
- Gao, W., Jiao, B., Yang, G., Hu, W., Chi, L., y Liu, J. (2013). Mobility robustness improvement through transport parameter optimization in HetNets. IEEE 24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC Workshops).
- ITU (2008). Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-Advanced. ITU-R, Technical Report ITU-R M.2135.
- López-Pérez, D., Guvenc, I., y Chu, X. (2012). Mobility management challenges in 3GPP heterogeneous networks. *IEEE Communications Magazine*, 70-78.
- Muñoz, P., Barco, R., y Bandera, I. de la (2013). On the Potential of *Handover* Parameter Optimization for Self-Organizing Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1895-1905.
- Tiedemann, E. (2015). Keynote: The next wave in wireless. The dawn of 5G. Wireless Innovation Conference on Wireless Communications Technologies and Software Defined Radio (WinnComm).
- Wang, C., Haider, F., Yang, Y., Yuan, D., Aggoune, H., Haas, H., *et al.* (2014). Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks. *IEEE Communications Magazine*, 122-130.