

Esquema de Selección de Modo para Redes MCN-MR basado en Información de Contexto

M.Carmen Lucas-Estañ, Javier Gozalvez

Uwicore, *Ubiquitous Wireless Communications Research Laboratory* <http://www.uwicore.umh.es>

Universidad Miguel Hernández de Elche. Avda. de la Universidad, s/n, 03202, Elche España.

m.lucas@umh.es, j.gozalvez@umh.es.

Resumen- Las redes *multi-hop* celular con retransmisores móviles (MCN-MR) ofrecen una solución para superar ciertas limitaciones de los sistemas celulares basados en infraestructura mediante la integración de las tecnologías ad-hoc y celular. Un aspecto importante para un despliegue efectivo de las redes MCN-MR es el diseño de esquemas que sean capaces de seleccionar el modo de conexión más adecuado (el enlace celular tradicional o el enlace *multi-hop*) para cada transmisión. Este trabajo propone un esquema de selección de modo que decide el modo de conexión óptimo y el número de recursos radio que deberían ser utilizados en el modo seleccionado basando su decisión en información sobre el contexto actual del usuario. Este estudio demuestra que el esquema propuesto ayuda a alcanzar los beneficios esperados de las redes MCN-MR en términos de capacidad y rendimiento ofrecido a los usuarios, adaptando su decisión según la probabilidad de encontrar retransmisores adecuados para las transmisiones *multi-hop*.

Palabras Clave- Selección de modo, redes celulares *multi-hop*, retransmisores móviles, gestión de recursos radio.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas celulares basados en infraestructura no son capaces de proporcionar niveles de calidad de servicio (*Quality of Service*, QoS) homogéneos en todo el área de cobertura debido al efecto de la distancia y de los obstáculos que atenúan e interfieren la señal entre la estación base (*Base Station*, BS) y los usuarios móviles. Las redes celulares multi-salto o *Multi-hop Cellular Networks* (MCNs), en las que la comunicación entre la BS y el usuario puede realizarse a través de otros nodos que actúan como retransmisores, han surgido como posible solución a este problema. Diferentes trabajos demuestran los beneficios que ofrecen las redes MCN en términos de capacidad, extensión del radio de cobertura y eficiencia energética [1]. Estos beneficios se obtienen por la sustitución del enlace celular directo de larga distancia entre la BS y el usuario, generalmente sin visión directa, por varias transmisiones *multi-hop* de menor distancia y mejores condiciones de comunicación. Los estándares celulares se han centrado inicialmente en el uso de retransmisores fijos [2]. Sin embargo, pruebas de campo han mostrado recientemente los importantes beneficios que se pueden obtener con el uso de retransmisores móviles (MCN-*Mobile Relays*, MCN-MR) [3]. En redes MCN-MR, la conexión entre el usuario y la BS se realiza a través de comunicaciones ad-hoc o dispositivo a dispositivo (*Device-to-Device*, D2D) entre el usuario y nodos retransmisores (*relay nodes*, RN), y un último enlace celular entre la BS y el RN más cercano a ésta. Los estándares comienzan a considerar los sistemas MCN-MR para aplicaciones de *public safety* y *proximity-services* (3GPP TR 22.803).

A pesar de que los beneficios que ofrecen las redes MCN-MR han sido demostrados en varios estudios, es

importante resaltar que estos beneficios solamente son alcanzables en escenarios en los que sea posible establecer una conexión *multi-hop* (MH) entre el nodo fuente y el nodo destino de la comunicación que garantice mejores prestaciones que el enlace celular directo de un único salto o *single-hop* (SH). Por tanto, la ganancia potencial de los sistemas MCN-MR está condicionada por la presencia de nodos retransmisores adecuados que ofrezcan buenas capacidades de comunicación para establecer el enlace MH. En este contexto, un aspecto clave para un despliegue eficaz de redes MCN-MR es el diseño de esquemas que sean capaces de seleccionar el modo de conexión (SH o MH) más adecuado bajo distintas condiciones de despliegue y operación del sistema [4].

Varios trabajos han analizado recientemente el problema de selección de modo. Los autores de [5] analizan un esquema de selección de modo que decide si dos usuarios de una tecnología celular situados en la misma celda deben comunicar entre ellos utilizando enlaces celulares tradicionales (es decir, realizando la comunicación a través de la BS) o utilizando comunicaciones D2D. Sin embargo, este escenario difiere del que tiene lugar en redes MCN-MR en el que la decisión que se debe tomar es si la conexión de un usuario con la BS debe realizarse a través del enlace celular SH o a través de un enlace MH utilizando otros nodos retransmisores móviles. Una propuesta interesante para redes MCN-MR es realizada en [6], donde se propone un esquema que selecciona el modo de conexión (SH o MH), y en el caso de MH, identifica de manera simultánea el RN a utilizar en la conexión MH. Para abordar ambos dilemas de manera conjunta, el mecanismo propuesto en [6] requiere que tanto el nodo destino de la comunicación (*Destination Node*, DN) como los posibles RN envíen información a la BS sobre el nivel de SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*) experimentado y la distancia entre ellos. Extraer esta información y su envío a la BS tiene un coste que puede no ser despreciable en escenarios con alta densidad de nodos en el sistema. En este contexto, los autores de este artículo proponen en [7] un esquema de selección de modo para redes MCN-MR que basa su decisión en información disponible en la BS, en particular, en la distancia entre la BS y el DN y en la densidad media de nodos en la celda. Con esta información, el esquema de selección de modo evalúa el posible beneficio y riesgo de establecer una conexión MH en lugar de un enlace celular SH tradicional, y decide el modo de conexión más conveniente en base a las condiciones de operación y de despliegue actuales. Además, el rendimiento de las conexiones MCN-MR también está condicionado por el número de recursos radio celulares disponibles para la conexión entre la BS y el RN más cercano a la BS. En este

contexto, un aspecto novedoso del esquema de selección de modo propuesto es que de manera simultánea a la decisión sobre el modo de conexión más conveniente (SH o MH), decide el número de recursos radio celulares que deberían ser utilizados en función del modo seleccionado.

Tal y como muestran [4] y [6], el uso de información de contexto es muy importante para realizar una gestión adecuada de los sistemas de comunicaciones (como por ejemplo, decidir sobre el modo de conexión a utilizar para cada transmisión). Este trabajo propone una versión mejorada del esquema de selección de modo propuesto en [7] incorporando información sobre el contexto del usuario en la decisión sobre el modo a utilizar en cada transmisión. Este trabajo evalúa la necesidad de considerar información precisa sobre el contexto actual del usuario, principalmente en sistemas MCN con retransmisores móviles, así como la mejora del rendimiento que proporciona. Además, se demuestra la capacidad del esquema propuesto para adaptar la decisión sobre el modo de conexión más adecuado para cada transmisión en escenarios con distintas densidades y distribuciones de nodos por la zona de cobertura de la BS.

II. ESQUEMA DE SELECCIÓN DE MODO

Este trabajo propone y estudia un esquema de selección de modo para redes MCN-MR que incorpora información sobre el contexto del usuario en el proceso de decisión sobre el modo más eficiente para llevar a cabo cada transmisión entre la BS y los DN. El esquema propuesto ha sido diseñado para transmisiones de servicios de datos en sentido descendente de manera que la BS puede decidir si establecer un enlace directo SH o una conexión MH con cada DN. Los autores de [8] muestran que la mayor parte del beneficio que puede proporcionar una conexión MCN-MR es alcanzado con un enlace de 2 saltos. Por este motivo, este trabajo se centra en el escenario de 2 saltos ilustrado en la Fig. 1, en el que la BS puede comunicar con el DN a través del enlace directo SH o a través de una conexión MH utilizando el nodo RN como nodo retransmisor. Este estudio considera que la conexión ad-hoc entre el RN y el DN es establecida utilizando tecnologías IEEE802.11. Aunque el esquema propuesto puede ser aplicado con cualquier tecnología celular, este estudio considera HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) para las transmisiones celulares SH y el enlace celular entre la BS y el RN de la conexión MH. El único requisito de los terminales de usuario para actuar como RN es que tengan 2 interfaces radio para poder establecer el enlace celular con la BS y el enlace ad-hoc con el DN.

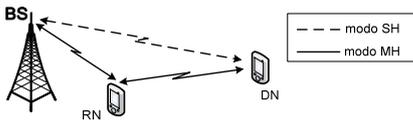


Fig. 1. Modo de conexión SH y MH entre la BS y el DN en un escenario MCN-MR de 2 saltos.

A. Beneficio y riesgo del modo MH

El esquema de selección de modo propuesto considera tanto los beneficios como los riesgos derivados de seleccionar el modo MH para llevar a cabo una comunicación entre la BS y un usuario en lugar de utilizar el enlace SH. Los beneficios que ofrece el uso del modo MH derivan de la posibilidad de encontrar un nodo RN que pueda establecer un enlace celular con la BS que proporcione un

mayor rendimiento que el que podría establecer el DN, y que además pueda transferir este mayor rendimiento al DN mediante el establecimiento de un enlace ad-hoc adecuado entre el RN y el DN. Sin embargo, establecer una conexión MH implica también unos riesgos. En primer lugar, existe el riesgo de que la BS no pueda encontrar un RN con el que establecer un enlace celular con mayor rendimiento que el enlace que podría establecer con el DN. En segundo lugar, aunque se encontrara este RN, es posible que no sea posible establecer un enlace ad-hoc entre el RN y el DN con suficiente calidad para transferir el rendimiento experimentado por el RN hasta el DN. Estas circunstancias resultarían en el establecimiento de un enlace MH que proporcionaría al DN un menor rendimiento que el enlace SH que se podría haber establecido entre la BS y el DN. Además, el proceso de encontrar nodos retransmisores y establecer una conexión MCN-MR extremo a extremo tiene un coste significativo en términos de señalización, siendo importante por tanto considerar los riesgos de escoger el modo MH en la decisión del esquema de selección de modo.

Este trabajo considera un sistema celular con anillos de QoS (Fig. 2) caracterizados por distintos niveles de calidad de los enlaces y distintos modos de transmisión óptimos. Los anillos de QoS pueden ser definidos como el área de cobertura de la BS en la que un determinado modo de transmisión es utilizado en mayor porcentaje. Los anillos de QoS más interiores están caracterizados por mejores niveles de calidad de enlace y, por tanto, por el uso de modos de transmisión con mayores tasas de transmisión de datos. El anillo de QoS en el que el modo de transmisión h es utilizado en mayor porcentaje ha sido denotado como Rh .

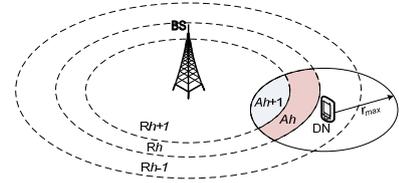


Fig. 2. Área de localización de los RN que permiten establecer al DN una conexión MH con mayor rendimiento que el enlace SH.

Un enlace MH mejoraría el rendimiento experimentado por un nodo DN a través del enlace SH si el enlace MH utiliza un RN situado en un anillo Rh^{RN} con un nivel de QoS mayor que el anillo Rh^{DN} en el que se encuentra el DN en el momento de establecer la conexión, es decir, si Rh^{RN} es tal que $h^{RN} > h^{DN}$. Además, es necesario que los nodos DN y RN se encuentren a una distancia máxima r_{max} que permita transferir el rendimiento experimentado por el RN hasta el DN [9]. Por lo tanto, una conexión MH proporcionaría al DN un rendimiento mayor que el enlace SH si la BS encontrara un RN dentro del área A definida como la unión de las áreas Ah^{RN} mostradas en la Fig. 2, las cuales se definen como el área de intersección entre el círculo C^{DN} (centrado en DN y con radio r_{max}) y los anillos Rh^{RN} con $h^{RN} > h^{DN}$:

$$A = \bigcup_{h^{RN}, h^{RN} > h^{DN}} Ah^{RN} = \bigcup_{h^{RN}, h^{RN} > h^{DN}} (Rh^{RN} \cap C^{DN}) \quad (1)$$

En este contexto, el rendimiento esperado $P_{MH}(s, d)$ de una conexión MH puede definirse como:

$$P_{MH}(s, d) = Beneficio_{MH}(s, d) \cdot (1 - Riesgo_{MH}(d)) \quad (2)$$

donde $Beneficio_{MH}$ representa el beneficio en términos de rendimiento que una conexión MH podría proporcionar al DN si se establece en condiciones adecuadas, y

$Riesgo_{MH}$ representa el riesgo de no poder establecer una conexión MH bajo dichas condiciones. El beneficio esperado por el DN de una conexión MH, $Beneficio_{MH}$, puede expresarse en función de la distancia d entre el DN y la BS y el número de recursos radio s asignados al enlace celular entre el RN y la BS según muestra la siguiente expresión:

$$Beneficio_{MH}(s, d) = \frac{\sum_{h^{RN}, h^{RN} > h^{DN}} P_{SH}(s, Rh^{RN}) \cdot \text{Prob}(\text{RN en } Ah^{RN})}{\sum_{h^{RN}, h^{RN} > h^{DN}} \text{Prob}(\text{RN en } Ah^{RN})} \quad (3)$$

En (3), $P_{SH}(s, Rh^{RN})$ representa el rendimiento del enlace celular entre la BS y un nodo RN situado en Rh^{RN} cuando se asignan s recursos radio celulares a dicho enlace y $\text{Prob}(\text{RN en } Ah^{RN})$ representa la probabilidad de encontrar un RN dentro del área Ah^{RN} definida en (1). Es importante resaltar que $Beneficio_{MH}(s, d)$ y por tanto $P_{MH}(s, d)$, depende de la distancia d entre la BS y el DN que determina el área de intersección Ah^{RN} de C^{DN} con los anillos de QoS Rh^{RN} , y por tanto, que determina la probabilidad de encontrar un RN en dicha área. Por otro lado, $P_{SH}(s, Rh)$ se define en función del anillo Rh en el que se encuentre el nodo correspondiente (Rh^{RN} o Rh^{DN} para RN o DN) ya que es razonable considerar que todos los usuarios situados en el mismo anillo Rh experimentan en media el mismo rendimiento celular al recibir el mismo número de recursos radio.

En (2), el riesgo resultante de intentar establecer una conexión MH deriva de la probabilidad de no encontrar un RN en el área A definida en (1):

$$Riesgo_{MH}(d) = 1 - \text{Prob}(\text{RN en } A) \quad (4)$$

$Riesgo_{MH}(d)$ se define en función de d ya que de nuevo la distancia d entre la BS y el DN determina el área de intersección de C^{DN} con los anillos de QoS Rh^{RN} .

B. Información de contexto del usuario

Tanto el beneficio como el riesgo de elegir el modo MH para llevar a cabo una transmisión entre la BS y un usuario DN se definen en función de la probabilidad de encontrar un nodo RN en el área A definida en (1). La probabilidad de encontrar un nodo en un área determinada de la zona de cobertura, $\text{Prob}(\text{RN en } A)$ o $\text{Prob}(\text{RN en } Ah^{RN})$, depende tanto de la densidad y distribución de nodos en la celda como del tamaño del área considerada. Realizar la estimación de estas probabilidades en base a información sobre el contexto del usuario permite estimar de manera precisa el beneficio y el riesgo que supondría la elección del modo MH en el proceso de selección de modo llevado a cabo por el esquema propuesto, permitiendo elegir el modo más eficiente para cada transmisión entre la BS y los usuarios. Para ello, el esquema de selección de modo hace uso de información disponible en la BS sobre el contexto del usuario.

En primer lugar, el esquema de selección de modo utiliza información sobre la distancia del DN a la BS para estimar el rendimiento de la conexión SH. Además, en base a esta distancia, el esquema calcula el área A en la cual debería encontrarse el RN para establecer una conexión MH que proporcione al DN un mayor rendimiento que la conexión SH directa con la BS. En segundo lugar, el esquema de selección de modo utiliza información proporcionada por la BS sobre la densidad de nodos en la celda (información disponible pues la BS conoce el número de nodos en su área

de cobertura y la distancia aproximada a la que se encuentran).

La distribución de los nodos en sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricas es comúnmente modelada en la literatura mediante un proceso homogéneo de Poisson [10]. Según este modelo, el número de nodos en una cierta región de área Z se distribuye según una distribución de Poisson con parámetro ρZ , siendo ρ la densidad media de nodos. Cuando los nodos se mueven según un modelo de movilidad que mantiene la distribución homogénea de los nodos por toda la celda a lo largo del tiempo (por ejemplo, el modelo de movilidad *Random Direction* o RD), la probabilidad de encontrar al menos un nodo en un área Z puede ser calculada según la distribución de Poisson como:

$$\text{Prob}(\text{nodo en } Z) = 1 - \exp(-\rho_{0-d_{BS}} Z) \quad (5)$$

donde $\rho_{0-d_{BS}}$ es la densidad media de nodos en el área de cobertura de la BS y es calculada como el cociente entre el número total de nodos, N , y el valor de dicha área:

$$\rho_{0-d_{BS}} = N / \pi d_{BS}^2 \quad (6)$$

En (6), d_{BS} representa el radio de la celda. Sin embargo, el movimiento de los nodos en sistemas reales suele dar lugar a distribuciones de nodos no uniformes a lo largo del área de cobertura de la BS. En este caso, la distribución espacial de los nodos en una región con área Z , siendo Z mucho menor que el área de cobertura de la BS por la cual se desplazan los nodos, es decir, $Z \ll \pi d_{BS}^2$, puede de nuevo ser aproximada por una distribución de Poisson [11]. En este contexto, la probabilidad de encontrar un nodo en una región con área Z , $Z \ll \pi d_{BS}^2$, puede calcularse utilizando (5). Sin embargo, en un escenario con distribución no uniforme de los nodos, considerar la densidad media de nodos en la celda en (5) puede conllevar un error considerable en la estimación de $\text{Prob}(\text{nodo en } Z)$. Por este motivo, en este trabajo se propone el uso de información sobre la densidad media de nodos en el anillo que intersecciona con el área Z para la cual se quiere calcular la probabilidad de encontrar al menos un nodo en ella. El esquema de selección de modo hace uso de la información sobre la densidad media de nodos en el anillo determinado por los radios interior y exterior d_{min} y d_{max} , representada por $\rho_{d_{min}-d_{max}} \cdot d_{min}$ y d_{max} corresponden a la distancia hasta la BS del punto del área Z más cercano y más distante a la BS respectivamente (en el caso del cálculo de $\text{Prob}(\text{RN en } Ah^{RN})$, $\rho_{d_{min}-d_{max}}$ corresponde a la densidad de nodos en el anillo de QoS Rh^{RN}). Si $N_{d_{min}-d_{max}}$ representa el número de nodos que se encuentran a una distancia d de la BS tal que $d_{min} < d \leq d_{max}$, $\rho_{d_{min}-d_{max}}$ es calculada como:

$$\rho_{d_{min}-d_{max}} = N_{d_{min}-d_{max}} / (\pi d_{max}^2 - \pi d_{min}^2) \quad (7)$$

Es importante resaltar que tanto $\rho_{0-d_{BS}}$ como $\rho_{d_{min}-d_{max}}$ es información disponible en la BS y que ésta proporciona al esquema de selección de modo en el momento de la decisión.

C. Selección de modo

El rendimiento de los modos de conexión SH y MH dependen del número de recursos radio celulares asignados y, por tanto, de la política de gestión de recursos radio (*Radio Resource Management*, RRM) implementada. Este trabajo emplea una versión adaptada de la técnica RRM MAXIHU

(*MAXIMUM Homogeneous Utility values*) propuesta por los autores en [12] para redes heterogéneas. MAXIHU fue originalmente diseñada para decidir para cada usuario la tecnología de acceso radio (*Radio Access Technology*, RAT) más adecuada. En este estudio, MAXIHU ha sido adaptada para abordar el dilema de selección de modo en redes MCN-MR. De manera diferente a propuestas de selección de modo anteriores, MAXIHU no sólo decide si una nueva transmisión en sentido descendente debe realizarse en el modo SH o MH, sino que también identifica el número de recursos radio celulares a utilizar (para ambos modos SH o MH).

MAXIHU tiene como objetivo proporcionar los mayores niveles de satisfacción a todos los usuarios. Para ello, MAXIHU explota la flexibilidad que ofrece un escenario multimedia en el que los usuarios presentan diferentes demandas y requieren un número diferente de recursos radio para obtener los mismos niveles de satisfacción. En este contexto, el nivel de satisfacción del usuario es expresado por valores de utilidad que identifican el número de recursos radio requerido por cada usuario para alcanzar distintos niveles de QoS en función del servicio demandado y de la tecnología utilizada en la transmisión. Para alcanzar su objetivo, MAXIHU busca maximizar el producto de los valores de utilidad percibidos por todos los usuarios en el sistema, expresado según la siguiente función objetivo:

$$\max \prod_{i=1}^n u_i = \max \sum_{i=1}^n \ln u_i \quad (8)$$

En (8), n representa el número total de usuarios demandando servicio en la celda y u_i representa el valor de utilidad asignado al usuario i en cada reparto de recursos radio. El valor de utilidad experimentado por cada usuario u_i es expresado como $u_i = \sum_{m=1}^2 \sum_{s=1}^S U_i(s, m) \cdot y_i^{s, m}$, donde $U_i(s, m)$ representa el valor de utilidad obtenido por el usuario i cuando recibe s recursos radio celulares en el modo m (en este estudio, $m \in \{SH, MH\}$) y $s \in [1, S]$ siendo S el número máximo de recursos radio celulares. $y_i^{s, m}$ es una variable binaria igual a uno si el usuario i recibe s recursos radio en el modo m , e igual a cero en caso contrario. En este contexto, el esquema de selección de modo propuesto se centra en decidir para cada usuario que variable $y_i^{s, m}$ toma el valor uno, considerando sólo variables $y_i^{s, m}$ correspondientes a asignaciones de recursos que proporcionan un valor de utilidad no nulo al usuario en el modo m . Identificar el valor de estas variables no sólo indicará el modo de conexión más apropiado (SH o MH) para cada usuario, sino que también indica el número de recursos radio celulares que deberían utilizarse en la conexión. En el modo MH, los recursos radio celulares son utilizados en el enlace entre la BS y el RN.

Para obtener la solución óptima al problema modelado, MAXIHU hace uso de técnicas de programación lineal entera. Por tanto, la función objetivo definida en (8) debe ser expresada de forma lineal, tal y como muestra la siguiente expresión (más información sobre la transformación matemática de la función objetivo puede encontrarse en [12]):

$$\max \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^2 \sum_{s=1}^S \ln(U_i(s, m)) \cdot y_i^{s, m} \quad (9)$$

La solución óptima para la función objetivo de MAXIHU debe cumplir varias restricciones impuestas por el sistema, las cuales deben ser expresadas también linealmente. En primer lugar, la solución está condicionada por el número limitado de recursos radio celulares disponibles en el sistema. En el escenario analizado en este trabajo, los recursos radio celulares son utilizados tanto por las transmisiones SH como por el enlace celular entre la BS y el RN que forma parte de la conexión MH. En este contexto, la restricción sobre la cantidad de recursos radio celulares disponibles en el sistema es expresada como:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^S s \cdot y_i^{s, SH} + \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^S s \cdot y_i^{s, MH} \leq S \quad (10)$$

La segunda restricción expresa el hecho de que cada usuario sólo puede tener una variable $y_i^{s, m}$ igual a uno:

$$\sum_{s=1}^S y_i^{s, SH} + \sum_{s=1}^S y_i^{s, MH} \leq 1 \quad \forall i \quad (11)$$

MAXIHU basa sus decisiones en los valores de utilidad que un usuario podría alcanzar al utilizar el modo de conexión SH o MH. En este contexto, es necesario integrar las métricas de beneficio y riesgo definidas en el apartado II.A. en la definición de los valores de utilidad utilizados por MAXIHU. Estos valores de utilidad intentan caracterizar el nivel de satisfacción del usuario en función del servicio de tráfico demandado, el modo de conexión (SH o MH) y el número de recursos radio celulares asignados. Este estudio evalúa el esquema de selección de modo propuesto en un escenario en el que todos los usuarios demandan transmisiones del servicio de navegación web. Siguiendo el análisis presentado en [12], los valores de utilidad para el servicio de navegación web $u_{web}(\cdot)$ se definen en función del *throughput* (th) experimentado por el usuario según:

$$u_{web}(th) = \begin{cases} 0 & \text{si } th \leq 1\text{Mbps} \\ A \cdot \exp(B \cdot (th - 1)) + 0.24 & \text{si } th \leq 2.3\text{Mbps} \\ 1 - C \cdot \exp(-D \cdot th) & \text{si } th > 2.3\text{Mbps} \end{cases} \quad (12)$$

con $A = 0.00013$, $B = 0.0056$, $C = 2.13$ y $D = 0.0025$

Para establecer la relación entre los valores de utilidad con el proceso de selección de modo, es necesario estimar el *throughput* experimentado por los usuarios en función de los distintos modos de conexión que el usuario puede establecer para llevar a cabo su transmisión (SH o MH) y el número de recursos radio celulares asignados. En el caso de una conexión SH o para el enlace entre la BS y el RN en una conexión MH, el *throughput* experimentado por el usuario que comunica con la BS depende del número de recursos radio celulares asignados y del anillo de QoS en el que se encuentre (Rh , con h igual a h^{RN} o h^{DN} para RN o DN). En este caso, el *throughput* experimentado por el usuario se denota como $th_{SH}(s, Rh)$.

Este estudio considera HSDPA para las transmisiones celulares. En HSDPA, los modos de transmisión se definen por la combinación de esquemas de modulación y codificación (MCS, *Modulation and Coding Schemes*), dando lugar a diferentes tasas de transmisión. Cada modo de transmisión está asociado con un valor de CQI (*Channel Quality Indicator*). Este estudio considera los 30 modos de transmisión asociados a los CQI definidos para terminales de categoría 10 (3GPP TS 25.214). En este contexto, el

throughput experimentado por un nodo $th_{SH}(s,Rh)$ a través del enlace SH puede expresarse como:

$$th_{SH}(s,Rh) = s \cdot rate_{CQIh} / codes_{CQIh} \quad (13)$$

donde $rate_{CQIh}$ y $codes_{CQIh}$ representa la tasa de transmisión de datos y el número de códigos del modo de transmisión asociado al CQI experimentado en Rh . Utilizando (13), el valor de utilidad que experimentaría el nodo DN i en el caso de comunicar con la BS a través de una conexión SH con s recursos radio celulares se expresa como:

$$U_i(s,SH) = U_{SH}(s,Rh_i^{DN}) = u_{web}(th_{SH}(s,Rh_i^{DN})) \quad (14)$$

Por otro lado, el valor de utilidad para el DN i en el caso de utilizar una conexión MH se define en función de la distancia d_i entre el usuario i y la BS (2):

$$U_i(s,MH) = U_{MH}(s,d_i) = Beneficio_{MH}(s,d_i) \cdot (1 - Riesgo_{MH}(d_i)) \quad (15)$$

donde $Beneficio_{MH}(s,d_i)$ y $Riesgo_{MH}(d_i)$ son calculados según las expresiones (3) y (4), sustituyendo $P_{SH}(s,Rh)$ por el valor de utilidad $U_{SH}(s,Rh)$ definido en (14).

El esquema de selección de modo propuesto utiliza los valores de utilidad definidos en (14) y (15) para caracterizar el nivel de satisfacción que los usuarios pueden alcanzar utilizando los modos de conexión SH o MH. El esquema de selección de modo propuesto decide en base a estos valores el mejor modo de conexión para cada transmisión resolviendo el problema de programación lineal entera modelado, es decir, decidiendo para cada usuario, qué variable $y_i^{s,m}$ toma el valor 1. Además de decidir el mejor modo de conexión a utilizar para cada usuario, la decisión alcanzada también indica el número de recursos radio celulares a utilizar en cada conexión.

III. ENTORNO DE EVALUACIÓN

El rendimiento del esquema de selección de modo propuesto ha sido evaluado utilizando una plataforma software propia implementada en C++ que simula un sistema con una única celda de radio 1000m. Aunque el esquema de selección de modo propuesto podría ser aplicado con cualquier tecnología celular, en la plataforma de evaluación se ha considerado HSDPA para las transmisiones SH y para el enlace entre la BS y los RNs en las conexiones MH. Para las conexiones ad-hoc entre los RNs y los DNs se considera el uso de IEEE 802.11g. Estas dos tecnologías han sido consideradas por la disponibilidad de un modelo empírico del throughput experimentado por enlaces MH de dos saltos propuesto en [9], y que ha sido incluido en la plataforma para modelar el throughput experimentado a través de conexiones MH. En base a este modelo, el valor de r_{max} se ha establecido en 150m. Este estudio considera los modos de transmisión de HSDPA asociados a los 30 CQI definidos para terminales de usuario de categoría 10 (3GPP TS 25.214). Las tasas de transmisión para los enlaces celulares (enlaces SH o enlaces BS-RN de conexiones MH) son seleccionadas en base al anillo de QoS en el que se encuentre el nodo (los anillos de QoS están asociados a los 30 CQI considerados). El objetivo de la plataforma no es modelar de forma precisa la transmisión radio, sino para medir la eficiencia del esquema propuesto bajo diferentes condiciones y escenarios. En este contexto, este estudio considera un escenario simplificado en el que no se modelan errores en la transmisión celular (el throughput es igual a la tasa de

transmisión de datos utilizada)¹. La BS dispone de una portadora con 14 códigos para transmisiones de datos.

Si se dispone de varios nodos que puedan actuar como RN en la zona A expresada en (1) en el establecimiento de una conexión MH, el RN es seleccionado de manera aleatoria entre todos los candidatos. Si no es posible encontrar ningún RN en A , el nodo seleccionado como RN es aquel que se encuentre más cerca del DN y a una menor distancia de la BS que el DN. En ese caso, es posible que el throughput del enlace MH sea menor que el que podría haber experimentado el DN si hubiera utilizado el enlace SH entre la BS y el DN.

La plataforma simula nodos que pueden actuar solamente como RN y nodos que pueden actuar como DN. Los usuarios DN demandan sesiones del servicio de navegación web² según el modelo presentado en [13]. Al comienzo de la simulación, los usuarios se distribuyen por toda la celda según una distribución de Poisson homogénea con densidad media ρ_{0-dBS} . Para analizar la capacidad del esquema de selección de modo propuesto para seleccionar el modo de conexión óptimo (SH o MH) bajo diferentes condiciones de operación, se han considerado diferentes densidades de nodos mostradas en la Tabla I (las densidades de nodos consideradas pueden corresponder a densidades de usuarios en entornos sub-urbanos o urbanos). Además, se ha considerado distintos modelos de movilidad que dan como resultado distintas distribuciones de los nodos en la celda. En primer lugar, se ha considerado el modelo de movilidad *Random Direction* (RD). RD selecciona de forma aleatoria una velocidad y dirección de movimiento para cada nodo. Cuando un nodo alcanza el borde de la celda, elige una nueva dirección y velocidad para continuar desplazándose. Este modelo de movilidad resulta en una distribución uniforme de los nodos en la celda en cualquier momento de la simulación. En segundo lugar, se ha simulado también el modelo de movilidad *Random Waypoint* (RW). RW selecciona una velocidad y un punto al cual dirigirse dentro de la celda de manera aleatoria. Cuando el nodo alcanza su punto destino, selecciona otro de manera aleatoria y se dirige hacia él. RW da lugar a una distribución no homogénea de los nodos en la celda, siendo mayor la concentración de nodos a menores distancias de la BS como se muestra en la

TABLA I
ESCENARIOS DE EVALUACIÓN Y DENSIDADES DE NODOS

Escenario	Número de nodos en la celda	Densidad media de nodos ρ_{0-dBS} (nodos/km ²)	Nodos en una circunferencia de radio 150m
50RN	50	15.9	1.13
100RN	100	31.8	2.25
400RN	400	127.3	9.00
1000RN	1000	318.3	22.50

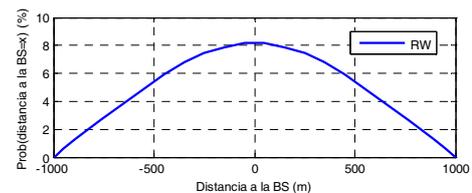


Fig. 3. Distribución de los nodos en la celda en función de la distancia a la BS con el modelo de movilidad RW (corte transversal por la BS).

¹ Este hecho no influencia la ganancia relativa alcanzada por el esquema de selección de modo propuesto.

² El rendimiento del esquema de selección de modo propuesto ha sido también evaluado bajo otras condiciones de tráfico multimedia mostrando las mismas tendencias en el rendimiento mostradas en este artículo.

Fig. 3. Para ambos modelos, la velocidad de los nodos es elegida de manera aleatoria entre 0 y 3m/s.

IV. ANÁLISIS DE RENDIMIENTO

El rendimiento alcanzado por el esquema propuesto ha sido evaluado en 2 escenarios distintos según la distribución de los nodos en la celda. En primer lugar, se ha realizado la evaluación del esquema propuesto en un escenario en el que los nodos se distribuyen de manera homogénea por la celda (uso del modelo de movilidad RD). Tras analizar el buen comportamiento del esquema propuesto al considerar una distribución uniforme de los nodos, se ha evaluado su rendimiento en un escenario más realista en el que los nodos se distribuyen de manera no homogénea por la celda (uso del modelo de movilidad RW). En este escenario es posible evaluar la capacidad del esquema propuesto para adaptarse a distintas condiciones de operación y despliegue del sistema. En ambos escenarios, el rendimiento alcanzado por el esquema de selección de modo propuesto ha sido comparado con el obtenido cuando sólo es posible utilizar el enlace SH directo tradicional (solo SH) y cuando sólo es posible utilizar el modo MH entre la BS y el DN (solo MH). Para realizar una comparación justa, MAXIHU es aplicado para realizar la gestión de los recursos radio celulares en ambos casos.

A. Escenario con distribución homogénea de los nodos

La Fig. 4 muestra la ganancia en términos de *throughput* que puede ser alcanzada utilizando el esquema de selección de modo en comparación a cuando sólo se considera el uso del modo SH y el modo MH respectivamente para llevar a cabo las transmisiones entre la BS y los DN. La ganancia obtenida es mostrada en función de la distancia entre el DN y la BS para las distintas densidades de nodos recogidas en la Tabla I. Además, la Fig. 5.a muestra el porcentaje de transmisiones satisfactorias realizadas cuando se aplica el esquema de selección de modo propuesto y para los casos en que sólo se considera el uso del modo SH y el modo MH respectivamente. Según las indicaciones dadas en 3GPP TS 22.105, la transmisión de una página web se considera satisfactoria si ésta se realiza en menos de 4 segundos. Los resultados mostrados en ambas figuras muestran que el rendimiento obtenido con el esquema de selección de modo propuesto es siempre igual o superior que cuando sólo se considera la posibilidad de establecer la comunicación a través de un único modo de conexión. La ganancia de *throughput* obtenida con el esquema de selección de modo con respecto a cuando sólo se considera el uso del modo SH (Fig. 4.a) aumenta con la distancia entre el DN y la BS para densidades de nodos medias y altas. Las ganancias son particularmente altas para DNs en el borde de la celda (ganancias superiores al 20% para usuarios situados a distancias superiores a 700m), lo cual es deseable ya que estos usuarios son los que experimentan los enlaces celulares con peor rendimiento, siendo por tanto los usuarios que más pueden beneficiarse del uso de redes MCN-MR.

De manera contraria, la ganancia que ofrece el esquema de selección de modo propuesto con respecto a cuando sólo se utilizan conexiones MH (Fig. 4.b y Fig. 5.a), es mayor cuanto menor es la densidad de nodos en la celda. En los escenarios con densidades media y alta, el rendimiento es prácticamente el mismo que al utilizar sólo el modo MH. La alta ganancia de *throughput* obtenida en los escenarios con

menor densidad de nodos resalta el hecho de que el uso del enlace MH no siempre es adecuado. Cuando la densidad de nodos en el sistema es baja, la probabilidad de encontrar un RN en el área *A* definida en (1) es baja. En los casos en los que no se encuentra un RN en *A* la conexión MH se establece utilizando un RN fuera de dicha área (se elige el RN más cercano al DN y que se encuentre a una distancia menor de la BS que el DN). En estos casos, el rendimiento obtenido a través de la conexión MH es bajo, obteniendo incluso un rendimiento menor que el que se obtiene mediante el enlace SH directo entre el DN y la BS; resultado que se extrae al observar la alta ganancia obtenida en los escenarios con baja densidad de nodos con respecto al uso de solo MH y la ganancia aproximadamente igual a 1 con respecto al uso del modo tradicional SH en estos mismos escenarios. Por este motivo, el porcentaje de transmisiones para las cuales el esquema de selección de modo propuesto elige el modo MH (resultados mostrados en la Fig. 6) en los escenarios con baja densidad de nodos es muy bajo, tan sólo el 3% y el 27% de las transmisiones en los escenarios 50RN y 100RN utilizan el modo MH. Es interesante resaltar el hecho de que la ganancia de *throughput* obtenida en los escenarios con densidad baja de nodos por el esquema de selección de modo propuesto con respecto a cuando sólo se considera el modo MH es aproximadamente uniforme independientemente de la distancia del usuario a la BS. Este hecho se debe a que la distribución homogénea de los nodos en la celda resulta en una probabilidad alta de no encontrar un nodo retransmisor adecuado aproximadamente igual a lo largo de toda la celda (existen diferencias por el cálculo del área en el que se busca el nodo). Al aumentar la densidad de nodos en el sistema, la

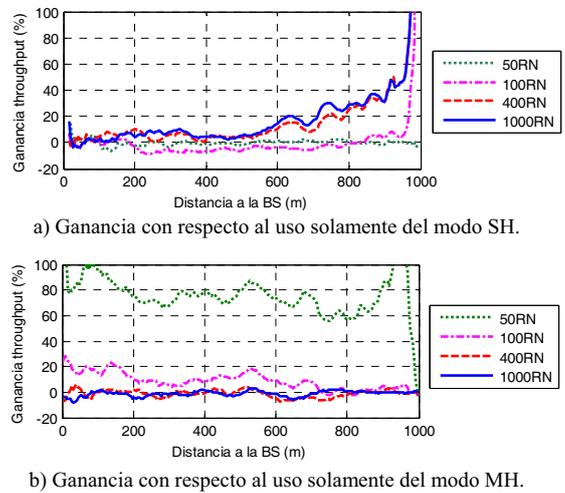


Fig. 4. Ganancia del *throughput* medio experimentado por los usuarios con el esquema de selección de modo con respecto al uso de solo modo SH y solo modo MH (escenario con distribución homogénea de los nodos).

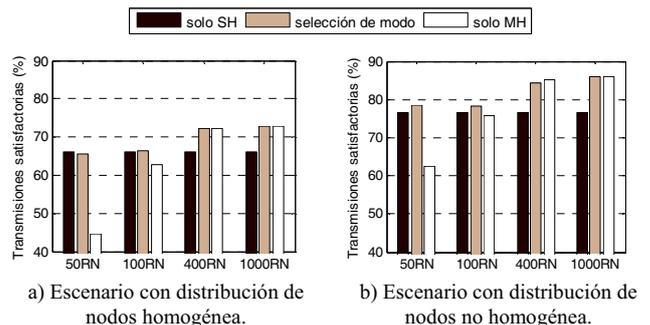


Fig. 5. Porcentaje de transmisiones satisfactorias.

probabilidad de encontrar un nodo retransmisor dentro del área de interés aumenta, y por tanto, los riesgos para establecer una conexión MH decrecen. En este caso, el esquema de selección de modo aumenta el porcentaje de transmisiones a través del modo MH (Fig. 6) consiguiendo un aumento del *throughput* experimentado por el usuario (Fig. 4) y de transmisiones satisfactorias (Fig. 5.a).

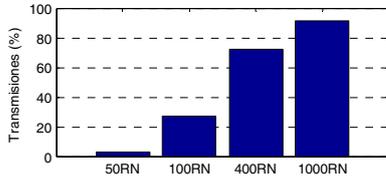


Fig. 6. Porcentaje de transmisiones a través del modo MH con el esquema de selección de modo en escenario con distribución de nodos homogénea.

B. Escenario con distribución no homogénea de los nodos

En primer lugar, se ha evaluado el rendimiento del esquema propuesto cuando el riesgo y beneficio de seleccionar el modo MH, $Riesgo_{MH}$ y $Beneficio_{MH}$, es estimado considerando la densidad media de nodos en la celda (esquema denotado en las figuras y tablas como selección de modo- $\rho_{0-d_{BS}}$). La Fig. 7 muestra la ganancia en términos del *throughput* medio experimentado por los usuarios con el esquema de selección de modo con respecto a los casos en los que sólo se considera el uso del modo SH y del modo MH respectivamente y la Fig. 5.b muestra el porcentaje de transmisiones satisfactorias para cada caso en el escenario con distribución de nodos no homogénea. Como es posible observar en ambas figuras, a pesar de la distribución no homogénea de los nodos en la celda, el esquema de selección de modo propuesto proporciona de nuevo un rendimiento igual o superior que al considerar solamente la posibilidad de transmitir por un único modo en todos los escenarios. Al analizar la ganancia de *throughput* obtenida con el esquema de selección de modo propuesto, es posible observar que la ganancia en el escenario con distribución de nodos no homogénea es incluso mayor que cuando los nodos se distribuyen de manera homogénea. Este resultado es debido a que la mayor concentración de nodos a distancias cortas de la BS hace que la probabilidad real de establecer un enlace MH con mayor rendimiento que el enlace SH directo entre la BS y el DN sea mayor que en el escenario con distribución homogénea de los nodos (y mayor que la considerada al utilizar la densidad media de nodos en la celda). Este hecho resulta en un mayor porcentaje de transmisiones satisfactorias, tal y como muestra la Fig. 5.b.

Al comparar la ganancia de *throughput* obtenida con respecto al caso en el que sólo se considera el modo MH (Fig. 7.b), la mayor concentración de nodos cerca de la BS resulta también en una reducción de la ganancia de *throughput* obtenida por el esquema propuesto en escenarios con densidad baja de nodos en comparación con el escenario en el que los nodos se distribuyen de manera homogénea. La mayor concentración de nodos cerca de la BS hace que el porcentaje de transmisiones MH que no encuentran un RN adecuado para establecer la comunicación disminuye, aumentando el *throughput* medio experimentado por los usuarios cerca de la BS en el caso en que sólo se considera el modo MH. Este hecho hace que la ganancia obtenida por el esquema de selección de modo sea menor a estas distancias.

Considerando la distribución no homogénea de nodos en

la celda, es interesante analizar el porcentaje de transmisiones para las cuales el esquema propuesto elige el modo MH en función de la distancia entre el DN y la BS. Para ello, la Fig. 8 muestra el porcentaje de transmisiones realizadas a través del modo MH en función de la distancia entre la BS y los usuarios para el escenario 1000RN con distribución no homogénea de los nodos ($RW-\rho_{0-d_{BS}}$). Para

realizar un análisis comparativo, la figura muestra también esta misma información para el caso en que el esquema propuesto es aplicado en el mismo escenario con distribución homogénea de los nodos (RD). Como es posible observar en la figura, el esquema de selección de modo elige el modo MH para el mismo porcentaje de transmisiones independientemente de la distribución de los nodos en el escenario, es decir, la mayor o menor densidad de nodos a distintas distancias de la BS no afecta a la decisión sobre el modo de conexión a utilizar. Este hecho conlleva errores que hacen que no se obtenga el mayor beneficio posible del sistema. A distancias cortas de la BS en las que la densidad de nodos real es mayor que la densidad media de nodos en la celda (considerada en el cálculo de $Riesgo_{MH}$ y $Beneficio_{MH}$), el riesgo real de seleccionar el modo MH es sobreestimado, no eligiendo el modo MH cuando probablemente la probabilidad de encontrar un RN adecuado era alta. Por el contrario, en los bordes de la celda donde la densidad de nodos real es menor que la densidad media de nodos en la celda, $Riesgo_{MH}$ es subestimado, lo cual puede resultar en el establecimiento de enlaces MH con un rendimiento menor al del enlace SH entre el DN y la BS.

Dado el anterior resultado, se propone la estimación de $Riesgo_{MH}$ y $Beneficio_{MH}$ en función de la densidad media de nodos en el contexto más cercano al usuario o DN, es decir, en función de la densidad media de nodos en los anillos en los que se debe buscar al nodo que actúe como RN en la conexión MH, $\rho_{d_{min}-d_{max}}$ (tal y como se presentó en la sección II.B). La Fig. 8 muestra también el porcentaje de transmisiones en función de la distancia entre la BS y los usuarios realizadas con el modo MH cuando el esquema de selección de modo utiliza $\rho_{d_{min}-d_{max}}$ en el escenario con distribución no homogénea de los nodos ($RW-\rho_{d_{min}-d_{max}}$).

Tal y como muestran los resultados, al considerar la densidad media de nodos por anillo, el esquema de selección de modo

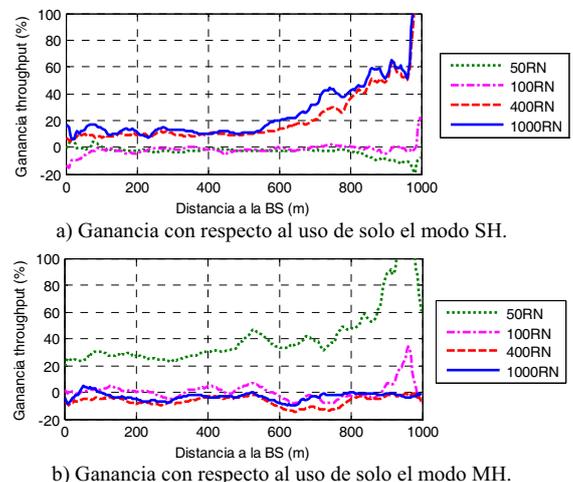


Fig. 7. Ganancia del *throughput* medio experimentado por los usuarios con el esquema de selección de modo- $\rho_{0-d_{BS}}$ con respecto al uso de solo modo SH y solo modo MH (escenario con distribución no homogénea de nodos).

elige el modo MH para un mayor porcentaje de transmisiones para usuarios cercanos a la BS (entre los 150 y 400m) al evaluar un riesgo $Riesgo_{MH}$ menor que cuando se considera la densidad media de nodos en la celda. Por el contrario, la elección del modo MH para transmisiones en el borde de la celda disminuye, ya que al considerar información más precisa sobre la densidad media de nodos en el contexto próximo al DN se obtiene una probabilidad menor de encontrar un nodo RN en el área de interés. La elección nula del modo MH para transmisiones realizadas con usuarios entre los 400 y 550m de la BS se debe a que el beneficio que ofrece el uso del modo MH a esas distancias no compensa el riesgo de seleccionar el modo MH en el escenario con baja densidad de nodos (el aumento de *throughput* que ofrece un enlace SH al pasar de un anillo de QoS al inmediatamente superior en esas distancias es menor que en otras zonas de la celda y no compensa el riesgo que supone la elección del modo MH en el escenario 100RN).

Por último, la Tabla II compara el porcentaje de transmisiones para las que el esquema propuesto selecciona el modo que proporciona al usuario el mayor *throughput* por recurso celular asignado cuando se considera respectivamente información sobre la densidad media de nodos en la celda o por anillos en el escenario con distribución de nodos no homogénea. Los resultados muestran que incorporando información sobre la densidad media de nodos en el contexto más cercano del usuario al evaluar el riesgo y beneficio de elegir el modo MH es posible aumentar el porcentaje de transmisiones que se realizan a través del modo más eficiente. Por ejemplo, el porcentaje de transmisiones que utilizan el modo que proporciona el mayor *throughput* por recurso asignado aumenta en un 10% y un 11% en los escenarios 100RN y 400RN al considerar la densidad media de nodos por anillo. De esta manera, el esquema de selección de modo propuesto es capaz de adaptar la decisión sobre el modo a utilizar a las distintas condiciones de operación del sistema y al distinto contexto que experimentan los usuarios.

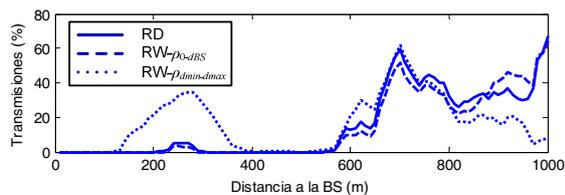


Fig. 8. Porcentaje de transmisiones que utilizan el modo MH en función de la distancia para el esquema de selección de modo propuesto.

TABLA II
PORCENTAJE DE TRANSMISIONES A TRAVÉS DEL MODO CON MAYOR THROUGHPUT POR RECURSO CELULAR EN ESCENARIO CON DISTRIBUCIÓN NO HOMOGÉNEA DE NODOS

	Selección de modo - $\rho_{0-d_{BS}}$	Selección de modo - $\rho_{d_{min}-d_{max}}$
50RN	55.37	57.69
100RN	43.04	47.43
400RN	68.00	75.52
1000RN	88.00	91.48

V. CONCLUSIONES

Este trabajo propone y evalúa un esquema de selección de modo para sistemas MCN-MR. El esquema propuesto selecciona el modo de conexión más adecuado (SH o MH)

considerando información sobre la densidad de nodos y la distancia entre la BS y el DN. Esta información es utilizada para estimar tanto el beneficio como el riesgo presentes en el establecimiento de una conexión MH. Además, el esquema de selección de modo propuesto identifica el número de recursos radio celulares a utilizar según el modo de conexión seleccionado. Los resultados obtenidos muestran que el esquema de selección de modo propuesto puede mejorar significativamente el nivel de *throughput* experimentado por los usuarios principalmente en el borde de la celda en escenarios con densidad media y alta de usuarios. Además, mediante la consideración de información sobre la densidad de nodos en el contexto más cercano del DN, el esquema de selección de modo es capaz de adaptar sus decisiones y escoger en cada caso el modo más eficiente según las condiciones del contexto actual del usuario. El estudio realizado ha demostrado que el esquema de selección de modo propuesto es una herramienta válida para alcanzar los beneficios esperados de las redes MCN-MR en términos de la mejora de la capacidad y del rendimiento experimentado por los usuarios principalmente en el borde de la celda.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y fondos FEDER bajo el proyecto TEC2011-26109.

REFERENCIAS

- [1] L. Long and E. Hossain, "Multihop Cellular Networks: Potential Gains, Research Challenges, and a Resource Allocation Framework", *IEEE Communications Magazine*, vol.45, no.9, pp.66-73, Sept. 2007.
- [2] 3GPP TR 36.806, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Relay architectures for E-UTRA (LTE-Advanced)", v9.0.0, Marzo 2010.
- [3] J. Gozalvez and B. Coll-Perales, "Experimental Evaluation of Multi-Hop Cellular Networks using Mobile Relays", *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 1, pp. 122-129, Julio 2013.
- [4] G. Fodor, et al., "Design Aspects of Network Assisted Device-to-Device Communications", *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no 3, pp. 170-177, 2012.
- [5] S. Hakola, T. Chen, J. Lehtomaki, T. Koskela, "Device-to-Device (D2D) Communication in Cellular Network - Performance Analysis of Optimum and Practical Communication Mode Selection", *Proc. IEEE WCNC 2010*, Sydney, Australia, 2010, pp. 1-6.
- [6] D. Wu, G. Zhu, L. Sun, D. Zhao, "Joint Mode/Route Selection and Power Allocation in Cellular Networks with Cooperative Relay", *Proc. IEEE ICC 2012*, Ottawa, Canada, 2012, pp. 4144-4149.
- [7] M.C. Lucas-Estañ, J. Gozalvez, "Gestión de Recursos Radio en Sistemas *Multi-hop* Celular", Libro de Actas URSI 2012, Elche, 2012.
- [8] S. Mukherjee, D. Avidor, K. Hartman, "Connectivity, Power, and Energy in a Multihop Cellular-Packet System", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol.56, no.2, pp.818-836, 2007.
- [9] B. Coll-Perales, J. Gozalvez, J. Sanchez-Soriano, "Empirical Performance Models for P2P and Two Hops Multi-hop Cellular Networks with Mobile Relays", *Proc. 8th ACM PM2HW2'13*, Nov. 2013, Barcelona.
- [10] Z. Gong, M. Haenggi, "Interference and Outage in Mobile Random Networks: Expectation, Distribution, and Correlation", *IEEE Trans. On Mobile Computing*, early access, 2012.
- [11] C. Bettstetter, "Topology properties of Ad hoc networks with random waypoint mobility", *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, v.7 n.3, Julio 2003.
- [12] M.C. Lucas-Estañ and J. Gozalvez, "On the Real-Time Hardware Implementation Feasibility of Joint Radio Resource Management Policies for Heterogeneous Wireless Networks", *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 12, no. 2, pp. 193-205, 2013.
- [13] R. Pries, Z. Magyari, P. Tran-Gia, "An HTTP Web Traffic Model Based on the Top One Million Visited Web Pages", *Proc. 8th EURO-NGI*, Karlskrona, Sweden, 2012, pp. 133-139.