

Gestión de Recursos Radio en Sistemas *Multi-hop* Celular

M.Carmen Lucas-Estañ, Javier Gozalvez

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

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.

Abstract- A key aspect of Multi-hop Cellular Networks-Mobile Relay (MCN-MR) is the definition of advanced radio resource management (RRM) schemes to guarantee adequate user QoS levels and maximum system's revenue. To this aim, RRM schemes should consider the potential QoS improvement that a multi-hop link could provide to users but also the potential QoS losses caused if an appropriated relay node could not be found. This work proposes the application of a joint RRM policy based on optimization techniques that simultaneously decides for each user the link (cellular or multi-hop) and the number of radio resources to use in its transmission aimed at maximising the resource's efficiency and guaranteeing user QoS fairness.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicaciones celulares tradicionales son incapaces de proporcionar los elevados y homogéneos niveles de calidad de servicio (*Quality of Service*, QoS) en toda el área de cobertura establecidos como requisitos para los futuros sistemas de comunicaciones de 4G. Esto es debido principalmente a la degradación que sufre la señal con la distancia y a las variables condiciones de propagación causadas por la presencia de obstáculos. Las redes *Multi-hop* Celular (*Multi-hop Cellular Networks*, MCN), mediante la integración de las tecnologías celular y ad-hoc, han surgido como candidatas para dar solución a este problema. El término *multi-hop* hace referencia a que la comunicación entre la estación base (*Base Station*, BS) y el terminal móvil (*Mobile Station*, MS) se realiza a través de nodos retransmisores (*Relay Nodes*, RN) que transmiten la información hasta el destino, sustituyendo el enlace directo de larga distancia entre origen y destino por múltiples enlaces de menor distancia y, por tanto, mayor tasa de transmisión. Los RN pueden ser tanto fijos (MCN-*Fixed Relay*, MCN-FR) como móviles (MCN-*Mobile Relay*, MCN-MR). Aunque el uso de MR implica una mayor complejidad de gestión de la comunicación, la posibilidad de usar los propios terminales de usuarios como RN incrementa las perspectivas de las redes MCN dada su flexibilidad, disponibilidad y bajo coste.

El potencial de las redes MCN para mejorar la capacidad de los sistemas celulares tradicionales, aumentar el *throughput* experimentado por los usuarios o extender el radio de cobertura de la celda ha sido demostrado en varios trabajos [1, 2]. En este contexto, las redes MCN son un claro candidato para formar parte de las futuras redes de comunicaciones móviles coexistiendo con otras tecnologías de acceso radio (*Radio Access Technology*, RAT) celulares y dando lugar a redes de comunicaciones móviles heterogéneas. Dado que la tecnología MCN utiliza los recursos radio de la tecnología celular en el enlace entre la BS y el RN que hace de puente entre ambas tecnologías, es necesaria la definición de técnicas avanzadas de gestión de

recursos radio (*Radio Resource Management*, RRM) que consideren el beneficio que puede proporcionar a los usuarios el uso de enlaces *multi-hop*. En este entorno de red heterogénea, la técnica de gestión de los recursos radio debería decidir para cada usuario si la comunicación entre el usuario y la BS se realiza a través del enlace celular directo o de un enlace *multi-hop*, así como el número de recursos radio que deberían recibir el usuario según la decisión sobre la tecnología a utilizar. Hasta el momento, la mayoría de los estudios disponibles en la literatura sólo abordan el problema de selección de la tecnología a utilizar (celular o MCN) basando la decisión en la distancia del usuario a la BS [3] o a si el usuario se encuentra o no bajo la cobertura de la BS [4].

Considerando el concepto de red heterogénea, este trabajo propone la aplicación de la técnica de gestión coordinada de recursos radio (*Joint RRM*, JRRM) MAXIHU (*MAXImum Homogeneous Utility values*) propuesta en [5] para abordar el problema de gestión de recursos radio en un sistema de comunicaciones en el que los usuarios tienen la posibilidad de utilizar tanto el enlace celular como un enlace MCN-MR para establecer comunicación con la BS. Con el objetivo de maximizar el número de usuarios que reciben un adecuado nivel de satisfacción, MAXIHU decide para cada usuario la tecnología a utilizar para realizar su transmisión y el número de recursos que debería recibir. MAXIHU basa su decisión en valores de utilidad que expresan el nivel de satisfacción del usuario según la asignación de recursos recibida de las distintas tecnologías que componen el sistema heterogéneo y del servicio demandado. En este contexto, en este trabajo se propone la definición de los valores de utilidad a utilizar tanto para la RAT celular como para la RAT MCN.

II. GESTIÓN DE RECURSOS RADIO EN SISTEMAS MCN

El presente trabajo estudia un sistema de comunicaciones móviles en el que los usuarios pueden establecer la comunicación con la BS mediante un enlace celular directo o a través de un enlace *multi-hop* de 2 saltos utilizando otros MS como RN; se ha considerado la tecnología MCN de 2 saltos en base al estudio realizado en [6] en el que se demuestra que la mayor parte del beneficio que es posible obtener del sistema MCN es obtenido con enlaces MCN de 2 saltos. Para la comunicación en el enlace ad-hoc, los terminales móviles utilizan la tecnología 802.11. En [7], se ha demostrado que en los enlaces *multi-hop* de 2 saltos es posible trasladar los niveles de *throughput* experimentados por el enlace celular en el RN hasta el MS destino siempre que la distancia entre el RN y el MS destino sea menor que una distancia máxima determinada. En base a este resultado, en este trabajo se ha establecido que el MS sólo establecerá

enlaces ad-hoc con RN que se encuentren a una distancia menor de 150m, distancia máxima determinada en [7] por debajo de la cual el enlace ad-hoc no limita el rendimiento del enlace *multi-hop* en situaciones de visión directa entre el RN y el MS. Este trabajo se centra en el enlace descendente por lo que el algoritmo RRM será ejecutado de manera centralizada en la BS cada vez que comience o finalice la transmisión de un usuario. En este contexto, el MS con el que quiere establecer comunicación la BS es denominado nodo destino de la comunicación o *Destination Node* (DN).

A. Valores de utilidad

La definición de los valores de utilidad propuestos en este trabajo se ha realizado a partir de las funciones de utilidad definidas en [5] para los servicios considerados en este trabajo: navegación web y correo electrónico. Estas funciones de utilidad representadas como $u_{web}(\cdot)$ y $u_{email}(\cdot)$ expresan la utilidad alcanzada por los usuarios en función del *throughput* experimentado (Fig. 1). Para establecer la relación entre los valores de utilidad mostrados en la Fig. 1 y las distintas asignaciones de recursos radio disponibles en el sistema, es necesario estimar el *throughput* que proporciona cada una de las posibles asignaciones de recursos de las distintas RATs, la RAT celular y la RAT MCN considerando el concepto de red heterogénea; se ha considerado EDGE como RAT celular, la cual es también utilizada en la parte celular del enlace *multi-hop*, aunque es importante destacar que el enfoque propuesto es aplicable a cualquier RAT que implemente técnicas de adaptación al medio. Para ello, se ha definido el concepto de anillos de QoS asociados a los distintos modos de transmisión de la RAT celular. Los anillos de QoS son definidos como el área de cobertura de la BS en la que el modo de transmisión asociado es asignado en mayor porcentaje a los usuarios de la RAT; el anillo de QoS asociado al modo de transmisión h de una tecnología se representa como Rh . La Fig. 2 muestra los 9 anillos de QoS asociados a los 9 esquemas de modulación y codificación (MCS) definidos en EDGE. Como muestra la Fig. 2, los anillos de QoS más cercanos a la BS están asociados a los MCS con mayores tasas de transmisión debido a la mejor calidad de la señal radio recibida en dicha zona. Una vez definidos los anillos de QoS, los valores de *throughput* utilizados para obtener la relación entre los valores de utilidad y las distintas asignaciones de recursos radio pueden ser establecidos simplemente conociendo la posición del DN. Para un usuario i situado en el anillo de QoS Rh de EDGE asociado al modo de transmisión MCS_h con tasa de transmisión txR_{MCS_h} , el *throughput* estimado para la asignación de s recursos radio ($th_{sEDGE,Rh}$) de EDGE se calcula como $th_{sEDGE,Rh} = s \cdot txR_{MCS_h}$. Conociendo el *throughput* estimado que el usuario i recibirá con cada asignación de recursos posible en la RAT celular, el valor de utilidad percibido por el usuario i cuando recibe s recursos radio utilizando la tecnología celular C es calculado como:

$$U_i(s, C) = \begin{cases} u_{web}(th_{sY,Rh}) & \text{si usuario } i \text{ demanda navegación web} \\ u_{email}(th_{sY,Rh}) & \text{si usuario } i \text{ demanda correo electrónico} \end{cases} \quad (1)$$

Realizar la definición de los valores de utilidad de cada usuario en función del anillo de QoS en el que se encuentra permite cuantificar el beneficio que un enlace *multi-hop* puede proporcionar a un usuario, tal y como se presenta a continuación. Los valores de utilidad propuestos en este trabajo para las distintas asignaciones de recursos de la RAT

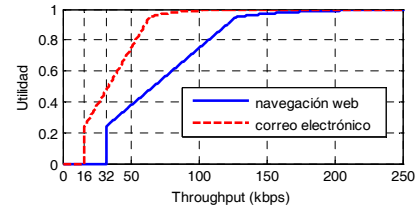


Fig. 1. Funciones de utilidad para los servicios de tráfico.

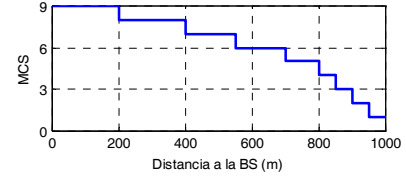


Fig. 2. Anillos de QoS para EDGE.

MCN intentan expresar tanto el beneficio como el riesgo que implica la decisión de asignar al usuario a la RAT MCN. El beneficio viene dado por las mejores condiciones de transmisión del RN que mediante el enlace *multi-hop* son trasladadas hasta el DN. En este contexto, el DN sólo establecerá enlaces *multi-hop* a través de RN que se encuentren a una distancia menor que el rango máximo establecido y situados en un anillo de QoS Rh asociado a un modo de transmisión con mejores prestaciones que el anillo Rh_{act} en el que se encuentra el DN ($h > h_{act}$), es decir, que se encuentre en el área $A(Rh \cap c_i) \forall h > h_{act}$, donde c_i es el círculo con centro en DN y radio igual al rango máximo de alcance establecido. Sin embargo, la BS no conoce la posición exacta de los nodos que pueden actuar como RN sino tan solo la densidad de nodos en el área de cobertura de la BS y el anillo de QoS en el que se encuentra el DN. Por tanto, el factor del beneficio de transmitir por la RAT MCN, $U_{i,beneficio}(s, M)$ siendo M la RAT MCN, se calcula como la suma de la probabilidad $P(\cdot)$ de encontrar al menos un RN en cada anillo Rh con $h > h_{act}$ multiplicado por la utilidad que experimentaría un MS en cada uno de los anillos utilizando el enlace celular, y normalizado por la suma de todas las probabilidades $P(\cdot)$:

$$U_{i,beneficio}(s, M) = \frac{\sum_{h=h_{act}+1}^{HC} U(s, C) \cdot P(\text{RN en } A(Rh \cap c_i))}{\sum_{h=h_{act}+1}^{HC} P(\text{RN en } A(Rh \cap c_i))} \quad (2)$$

En (2), HC representa el número de modos de transmisión definidos en la RAT celular. Ya que los MS se distribuyen por el escenario según una distribución de Poisson (Sección IV) con densidad ρ , la probabilidad de encontrar al menos un MS que pueda actuar como RN en un área A se calcula según la expresión $P(\text{MS en } A) = 1 - \exp(-\rho A)$.

La decisión de asignar al usuario a la RAT MCN implica el riesgo de que no exista ningún MS que pueda actuar como RN. En este caso, el DN comunicará con la BS a través de su enlace celular, pudiendo ocurrir que el número de recursos radio recibidos que le proporcionaba un adecuado nivel de QoS utilizando un enlace *multi-hop* no sea suficiente para satisfacer sus requisitos de QoS al utilizar el enlace celular. El factor de riesgo $U_{i,riesgo}(s, M)$ se ha definido por tanto como la probabilidad de encontrar al menos un RN en un anillo Rh con $h > h_{act}$, $U_{i,riesgo}(s, M) = P(\text{RN en } \sum_{h=h_{act}+1}^{HC} A(Rh \cap c_i))$.

En este contexto, la utilidad percibida por el usuario al recibir s recursos radio en la RAT MCN es expresada como $U_i(s, M) = U_{i,beneficio}(s, M) \cdot U_{i,riesgo}(s, M)$.

B. Técnica MAXIHU

MAXIHU es una técnica JRRM que decide para cada usuario activo en una red de comunicaciones móviles heterogénea la RAT a la que debe ser asignado y el número de recursos que debería recibir de dicha RAT para obtener un adecuado nivel de satisfacción. MAXIHU intenta aprovechar los distintos requisitos de los usuarios (en términos de QoS, calidad del canal radio, etc.) para realizar un reparto eficiente de los recursos radio y lograr garantizar el máximo nivel de satisfacción al mayor número de usuarios posible. Además, MAXIHU ha sido definida siguiendo una política de igualdad entre usuarios según la cual intenta proporcionar niveles de satisfacción homogéneos, y los más altos posibles, a todos los usuarios. Para conseguir la solución óptima, MAXIHU modela el problema de gestión de los recursos radio mediante una serie de ecuaciones lineales para posteriormente aplicar técnicas de optimización y programación lineal. En este contexto, MAXIHU busca maximizar el valor del producto de los valores de utilidad percibidos por todos los usuarios activos en el sistema, expresando su función objetivo como:

$$\max \prod_{i=1}^N u_i = \max \sum_{i=1}^N \ln u_i \quad (3)$$

donde N corresponde a la carga de usuarios en el sistema y u_i representa el valor de utilidad asignado al usuario i en el reparto actual expresado como $u_i = \sum_{r=1}^{c^r} \sum_{s=1}^{c^r} U_i(s,r) \cdot y_i^{s,r}$, siendo

$U_i(s,r)$ el valor de utilidad obtenido por el usuario i cuando recibe s recursos radio de la RAT r , $r \in \{C, M\}$, y $s \in [1, c^r]$ con c^r igual al máximo número de recursos radio disponibles en cada RAT; los valores $U_i(s,r)$ corresponden a los valores definidos en el apartado anterior. $y_i^{s,r}$ es una variable binaria igual a 1 si el usuario i recibe s recursos de la RAT r y 0 en caso contrario. MAXIHU debe decidir qué variable $y_i^{s,r}$ debe ser igual a uno para cada usuario. Para aplicar técnicas de programación lineal para resolver el problema, la función objetivo debe ser expresada de manera lineal, tal y como se muestra en el lado derecho de (3). El lector es remitido a [5] para obtener detalles adicionales del algoritmo.

La solución óptima a la función objetivo de MAXIHU está sujeta a varias restricciones impuestas por el sistema y por los servicios demandados que también son modeladas por MAXIHU. A continuación son presentadas las restricciones que resultan de interés en este trabajo. La primera de ellas es el criterio de prioridades establecido en el sistema, según el cual, los usuarios no pueden recibir valores de utilidad mayores que otros usuarios de mayor prioridad, siendo los usuarios del servicio de navegación web más prioritarios que los usuarios del servicio de correo electrónico. La segunda restricción viene impuesta por la cantidad de recursos radio disponibles en el sistema. En una red heterogénea en la que una de las RATs es la tecnología MCN, la restricción del planteamiento original definida en [5] debe ser adaptada, ya que MCN hace uso de los recursos de la RAT celular. La restricción impuesta por la disponibilidad de recursos en el sistema se expresa como:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{s=1}^{c^r} s \cdot y_i^{s,C} + \sum_{i=1}^N \sum_{s=1}^{c^r} s \cdot y_i^{s,M} \leq c^r \quad (4)$$

Si considerando las restricciones impuestas el problema no tiene solución, los usuarios de menor prioridad son

eliminados del reparto hasta poder alcanzar una solución. Si todos los usuarios tienen la misma prioridad, los usuarios más alejados de la BS son eliminados en primer lugar.

III. SIMULADOR DE REDES HETEROGÉNEAS MCN

La propuesta realizada para gestionar los recursos radio de una red MCN ha sido evaluada utilizando una plataforma de simulación implementada en C++ que considera un sistema de comunicaciones con la tecnología EDGE que permite que los usuarios se conecten a la red mediante enlaces directos con la BS (enlace celular) o enlaces *multi-hop* (tecnología MCN de 2 saltos). La plataforma emula la distribución de los recursos radio modelando su naturaleza discreta y las distintas prestaciones que proporcionan los modos de transmisión de EDGE. La plataforma modela los servicios de navegación web y correo electrónico siendo posible configurar la carga de usuarios en el sistema y la distribución de los usuarios entre los distintos servicios. La plataforma emula dos tipos de nodos: nodos DN y nodos RN, pudiendo configurar el número de nodos de cada tipo de manera independiente. Inicialmente, los nodos se distribuyen según una distribución homogénea de Poisson por el área de cobertura de la BS; solamente ha sido emulada una única celda. Los nodos se mueven según el modelo de movilidad *Random Direction* ($[V_{min}, V_{max}] = [0, 3\text{m/s}]$ y $[D_{min}, D_{max}] = [0, 2\pi]$). En el escenario de simulación considerado se ha configurado una BS con un rango de cobertura de 1000m y dos portadoras (16 *timeslots*). Han sido simuladas cargas de 8 y 15 usuarios por celda que actuarán como DN y densidades de RN de 0 (sólo sistema celular), 200 y 400 nodos por celda (entorno urbano). Las nuevas peticiones de servicio se distribuyen entre los servicios de navegación web y correo electrónico según el 80% y el 20% respectivamente.

IV. RENDIMIENTO DE MAXIHU EN SISTEMAS MCN

Las Tablas 1, 2 y 3 muestran el rendimiento obtenido con MAXIHU para distintas cargas de usuarios y distintas densidades de RN en la celda. La Tabla 1 muestra el número total de transmisiones (Tx) realizadas y el porcentaje de transmisiones satisfactorias para cada servicio considerando las indicaciones dadas por el 3GPP (TS 22.105) que establece que las transmisiones de navegación web y correo electrónico son consideradas satisfactorias si éstas se realizan en menos de 4s. Esta tabla también muestra el número de usuarios de cada servicio que participa en cada reparto de recursos radio realizado por MAXIHU y el número de usuarios del servicio de correo electrónico que recibe recursos; esta información no es mostrada para el servicio de navegación web pues el 100% de los usuarios que demandan este servicio reciben recursos al ser el servicio con mayor prioridad. Estos resultados muestran que la tecnología MCN permite realizar un uso más eficiente de los recursos radio de la tecnología celular consiguiendo aumentar el número de transmisiones realizadas en un tiempo determinado para ambos servicios. Además de aumentar el número de transmisiones, el porcentaje de transmisiones satisfactorias para el servicio de correo electrónico ha aumentado considerablemente mientras que para el servicio de navegación web se mantiene aproximadamente constante. Es importante resaltar que el beneficio que proporciona el uso de la tecnología MCN es mayor al aumentar el número de posibles RN en la celda. Como muestra la Tabla 2, al

		Correo electrónico				Navegación web		
		Tx	% Satisf	Usuarios por reparto	Usuarios con recursos	Tx	% Satisf	Usuarios por reparto
8 MS	celular	22882	62.34	5.46	2.76	90913	97.08	2.54
	200 RN	25075	65.47	5.21	3.19	95965	96.87	2.79
	400 RN	26680	69.23	5.10	3.56	107154	97.07	2.90
15 MS	celular	29012	46.34	11.83	3.03	115873	96.99	3.17
	200 RN	30643	49.44	11.57	3.36	122548	96.88	3.43
	400 RN	33799	53.22	11.46	3.79	135309	97.16	3.54

Tabla 1. Rendimiento obtenido por los distintos servicios.

	8 MS		15 MS	
	% usuarios asignados a MCN	% usuarios transmitiendo por MCN	% usuarios asignados a MCN	% usuarios transmitiendo por MCN
200 RN	38.01	29.36	18.41	13.40
400 RN	49.44	44.61	26.89	23.66

Tabla 2. Porcentaje de usuarios asignados a MCN.

	Correo electrónico			Navegación web		
	Throughput (kbps)		Utilidad	Throughput (kbps)		Utilidad
	Media	Varianza		Media	Varianza	
celular	75.43	17151.0	0.46	124.87	8302.6	0.74
200 RN	53.46	8797.0	0.47	108.95	4173.3	0.72
400 RN	52.83	6992.7	0.53	111.35	2806.3	0.76

Tabla 3. QoS asignado a los usuarios en el escenario con 8 usuarios.

umentar el número de RN, MAXIHU asigna a un mayor porcentaje de usuarios a MCN pues el riesgo de no encontrar RN con los que establecer el enlace ad-hoc se reduce. La Tabla 2 muestra que la mayor parte de los usuarios que son asignados a MCN encuentran un RN a través del cual establecer el enlace *multi-hop*. Esto demuestra la adecuada definición de las funciones de utilidad propuesta para MCN y en concreto, del factor de riesgo definido.

Los resultados de la Tabla 1 muestran que al utilizar la tecnología MCN, un mayor número de usuarios recibe recursos en cada reparto. Esto se debe a que al utilizar un enlace *multi-hop*, las mejores condiciones del canal radio que experimenta el RN son trasladadas hasta el DN, necesitando por tanto un menor número de recursos para satisfacer sus requisitos de QoS, por lo que es posible atender a un mayor número de usuarios con la misma cantidad de recursos. Este incremento en el número de usuarios atendidos incluye principalmente a los usuarios más alejados de la BS (estos son los primeros en ser eliminados del reparto cuando no es posible atender a todos los usuarios). Aunque considerar la RAT MCN permite proporcionar valores de *throughput* más elevados a los usuarios situados a mayor distancia de la BS que cuando sólo se considera la RAT celular, el valor de *throughput* experimentado por estos usuarios sigue siendo menor que el recibido por usuarios más cercanos a la BS. Este hecho resulta en un valor de *throughput* medio recibido por los usuarios de ambos servicios mayor cuando sólo se considera la RAT celular. Sin embargo, este mayor *throughput* no se traduce en un mayor valor medio de utilidad ni un mayor porcentaje de transmisiones satisfactorias; como muestra la Fig. 1, a partir de un determinado nivel de QoS, el crecimiento de la utilidad con el *throughput* disminuye considerablemente. Estos resultados de nuevo demuestran el uso más eficiente de los recursos radio que permite realizar el uso de la tecnología MCN. Por último, es importante resaltar que la tecnología MCN permite garantizar mayor igualdad entre usuarios de distintos servicios siguiendo la política de igualdad bajo la cual ha sido definida MAXIHU e incluso entre usuarios del mismo

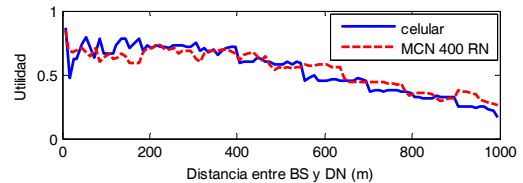


Fig. 3. Utilidad media de los usuarios de navegación web en función de la distancia entre BS y DN para el escenario con 8 usuarios.

servicio como demuestra la menor varianza del *throughput* recibido por los usuarios.

Para demostrar el potencial que ofrece la tecnología MCN para proporcionar homogeneidad en términos de QoS en toda la celda, la Fig. 3 muestra el valor de utilidad medio recibido por los usuarios del servicio de navegación web en función de la distancia entre el DN y la BS en un escenario en el que todos los usuarios demandan este servicio. En este escenario en el que todos los usuarios presentan la misma prioridad, es posible observar como la tecnología MCN y una gestión adecuada de los recursos radio permiten garantizar niveles de satisfacción más homogéneos a lo largo de toda la celda.

V. CONCLUSIONES

Este trabajo ha abordado el problema de gestión de los recursos radio en un sistema MCN-MR. Para ello, el sistema ha sido considerado como una red heterogénea en el que la RAT celular y la RAT MCN-MR coexisten dando servicio a los usuarios. La técnica de gestión de recursos propuesta decide de forma simultánea la RAT a la que debe ser asignado cada usuario y el número de recursos necesario dentro de dicha RAT para obtener un adecuado nivel de satisfacción. Los resultados demuestran que, considerando los posibles beneficios y riesgos de la decisión de asignar a cada usuario a la RAT MCN-MR, la técnica es capaz de explotar el potencial ofrecido por MCN-MR para realizar un uso más eficiente de los recursos radio, garantizando mejores y más homogéneos niveles de QoS en toda la celda.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por Ministerio de Ciencia e Innovación (TEC2008-06728) y Ministerio de Economía y Competitividad y Fondos FEDER (TEC2011-26109).

REFERENCIAS

- [1] R. Pabst, et al., "Relay-based Deployment Concepts for Wireless and Mobile Broadband Radio", *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 9, pp. 80-89, 2004.
- [2] M.F. Murad Hossain, A. Mammela, H. Chowdhury, "Impact of Mobile Relays on Throughput and Delays in Multihop Cellular Network", in *Proc. ICWMC '08*, pp.304-308, 2008.
- [3] L.K. Law, K. Pelechrinis, S.V. Krishnamurthy, M. Faloutsos, "Downlink Capacity of Hybrid Cellular Ad Hoc Networks", *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol.18, no.1, pp.243-256, 2010.
- [4] D. Cavalcanti, D. Agrawal, K. Cordeiro, Bin Xie, A. Kumar, "Issues in integrating cellular networks WLANs, AND MANETs: a futuristic heterogeneous wireless network", *IEEE Wireless Communications*, vol.12, no.3, pp. 30-41, 2005.
- [5] M.C. Lucas-Estaña, J. Gozalvez, "On the Real-Time Hardware Implementation Feasibility of Joint Radio Resource Management Policies for Heterogeneous Wireless Networks", *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2011, doi: 10.1109/TMC.2011.256.
- [6] 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.
- [7] B. Coll-Perales, J. Gozalvez, "Modelo Empírico de Comunicaciones Multi-hop Celular con Retransmisores Móviles", *Libro de actas URSI 2012*, Elche.