

Eficiencia Energética a través de Procesos Oportunistas en Redes Multi-hop Celular

B. Coll-Perales⁽¹⁾, J. Gozalvez⁽¹⁾, O. Lazaro⁽²⁾

bcoll@umh.es, jgozalvez@umh.es, olazaro@innovalia.org

⁽¹⁾ Laboratorio Uwicore. Universidad Miguel Hernández de Elche. Avda. de la Universidad, s/n, 03202, Elche.

⁽²⁾ Asociación Innovalia. C/ Rodríguez Arias, 6 Dpto 605, 48008, Bilbao.

Abstract- Cellular networks face significant challenges as a result of the growth of cellular data traffic, with a significant portion of such traffic being delay tolerant. Multi-hop Cellular Networks (MCNs) can help address the foreseen capacity and energy-efficiency constraints of cellular networks through the integration of cellular and Device to Device (D2D) communications. To this aim, this work proposes and studies the use of opportunistic store, carry and forward mechanisms in MCN networks to increase energy efficiency for delay tolerant traffic. Numerical and simulation results demonstrate that significant energy benefits (above 90%) can be achieved through the use of opportunistic forwarding in MCN networks.

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento exponencial en el tráfico de datos que las redes celulares están experimentando representa un importante reto en términos de capacidad y energía. De entre las alternativas para hacer frente a este reto se encuentran las comunicaciones entre dispositivos (*Device-to-Device*, D2D) y las redes celulares multi-salto (*Multi-hop Cellular Networks*, MCN). Las redes MCN sustituyen enlaces directos de larga distancia (y generalmente sin visión directa – *Non Line of Sight* – NLOS) entre el terminal de usuario y la estación base (*Base Station*, BS) por varios enlaces de menor distancia y de mayor calidad. Inicialmente, las redes MCN se centraron en el uso de retransmisores fijos. Sin embargo, las redes MCN con retransmisores móviles y haciendo uso de comunicaciones D2D han demostrado poder ofrecer importantes beneficios en términos de capacidad, calidad de servicio (*Quality of Service*, QoS) y energía [1]. Estas redes pueden beneficiarse también de la integración de mecanismos de red oportunistas. Los mecanismos oportunistas sacan provecho de la movilidad de los nodos, y del paradigma ‘*store, carry and forward*’ para establecer enlaces entre dispositivos móviles en función a las oportunidades de contacto. Este modo de operación puede resultar en un retraso en la comunicación extremo a extremo. Sin embargo, es importante hacer notar que los servicios tolerantes a retardos representan una proporción importante del total del tráfico de datos cursado en las redes celulares según el informe anual de Cisco [2]. Algunos ejemplos de servicios tolerantes a retardos son: video *streaming* (e.g. YouTube, Ustream), actualizaciones de redes sociales (e.g. Facebook), emails, actualizaciones de software y firmware, mensajes de datos/voz, y servicios en la nube (e.g. Dropbox). Los mecanismos oportunistas pueden explotar la tolerancia al retardo de ciertos servicios para buscar la eficiencia en los contactos entre dispositivos, y por lo tanto reducir el consumo energético sin sacrificar la QoS del usuario final.

En este contexto, este artículo estudia la integración de mecanismos oportunistas en redes MCN utilizando retransmisores móviles y comunicaciones D2D. En particular, el artículo investiga la capacidad de los esquemas oportunistas de reducir el consumo energético de servicios tolerantes a retardos en comunicaciones en sentido ascendente en redes MCN de 2 saltos. Para alcanzar este objetivo, el artículo desarrolla primero un entorno analítico que permite identificar la localización óptima del retransmisor móvil, y la localización en la que el retransmisor necesita empezar el reenvío de la información a la red celular para minimizar el consumo energético total de la comunicación extremo a extremo. Esta configuración óptima es utilizada como referencia para el diseño de un esquema oportunista más realista que relaja la necesidad de encontrar a un retransmisor móvil en el lugar óptimo en el instante identificado. En este esquema, el nodo fuente espera a que un nodo retransmisor alcance la localización óptima para iniciar la transmisión D2D. Para estimar el tiempo necesario que el nodo fuente debe retrasar la transmisión D2D, este estudio propone el uso de información de contexto ya disponible en los sistemas celulares: densidad y distribución de los nodos dentro de la celda. El estudio demuestra que el esquema oportunista propuesto para redes MCN utilizando retransmisores móviles y comunicaciones D2D puede proporcionar importantes beneficios energéticos en comparación con otros esquemas oportunistas y la comunicación celular tradicional.

II. COMUNICACIONES OPORTUNISTAS EN REDES MCN

Este estudio considera comunicaciones oportunistas MCN de 2 saltos como se muestra en el escenario de la Fig. 1. En el escenario, un nodo fuente (*Source Node*, SN) estático quiere transmitir información a la BS. Para ello puede utilizar las capacidades ‘*store, carry and forward*’ de un dispositivo móvil (*Mobile Relay*, MR). El estudio considera un servicio tolerante a retardos que requiere que la información sea transmitida a la BS antes del tiempo límite o *deadline* T . El tiempo necesario para transmitir la información desde SN a BS se calcula teniendo en cuenta: 1) el tiempo de la transmisión D2D desde SN a MR (*D2D tx*), 2) el tiempo que el MR almacena y transporta la información (*Store and Carry*), y 3) el tiempo de la transmisión celular desde MR a BS (*Cellular tx*). Como se muestra en la figura, estimar el tiempo necesario para cada uno de estos procesos es equivalente a determinar la localización del MR en la que la transmisión D2D comienza (Opt_{Xi}) y la localización del MR en la que la transmisión celular comienza (Opt_{Yi}).

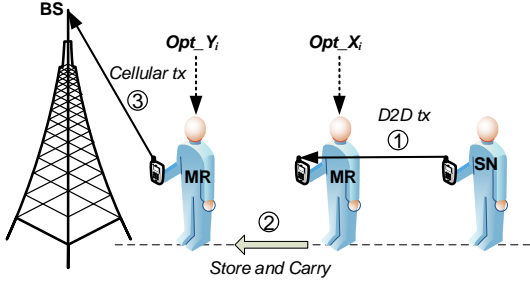


Fig. 1. Escenario para las comunicaciones oportunistas MCN de 2 saltos.

Para identificar estas localizaciones óptimas (Opt_X_i , Opt_Y_i), este estudio plantea el siguiente problema de optimización multi-objetivo (en el problema de optimización el tiempo límite T se ha discretizado como $\{\tau_0, \tau_1 \dots \tau_T\}$):

$$o.f : \min \left(\begin{array}{l} \sum_{\tau=\tau_0}^{\tau_{b-1}} (E_{D2D}(d_{SN-MR}, \tau) + \tau \cdot (P_R + P_W)) + \textcircled{1} \\ \sum_{\tau=\tau_b}^{\tau_{c-1}} \tau \cdot P_{IDLE} + \textcircled{2} \\ \sum_{\tau=\tau_c}^{\tau_{c+m}} (E_{cell}(d_{MR-BS}, \tau) + \tau \cdot P_W) + \textcircled{3} \end{array} \right) \quad (1)$$

st :

$$\sum_{\tau=\tau_0}^{\tau_{b-1}} TR_{D2D}(d_{SN-MR}) \cdot \tau \geq F \quad (2)$$

$$\sum_{\tau=\tau_c}^{\tau_{c+m}} TR_{cell}(d_{MR-BS}) \cdot \tau \geq F \quad (3)$$

$$0 \leq \tau_0 < \tau_{b-1} < \tau_b \leq \tau_{c-1} < \tau_c < \tau_{c+m} \leq T \quad (4)$$

En $\textcircled{1}$, $\sum_{\tau=\tau_0}^{\tau_{b-1}} E_{D2D}(d_{SN-MR}, \tau)$ es la energía consumida en la transmisión D2D entre SN y MR en el intervalo de tiempo $\{\tau_0, \tau_1 \dots \tau_{b-1}\}$, y considerando que la separación entre SN y MR es d_{SN-MR} en τ . $\sum_{\tau=\tau_0}^{\tau_{b-1}} \tau \cdot (P_R + P_W)$ es la energía consumida

por la unidad de almacenamiento en SN mientras transmite la información, y en el MR mientras la recibe. En $\textcircled{2}$,

$\sum_{\tau=\tau_b}^{\tau_{c-1}} \tau \cdot P_{IDLE}$ representa la energía consumida en MR cuando

el nodo almacena y transporta la información hacia la BS. Este proceso tiene lugar en el intervalo $\{\tau_b, \tau_{b+1} \dots \tau_{c-1}\}$.

Finalmente, $\sum_{\tau=\tau_c}^{\tau_{c+m}} E_{cell}(d_{MR-BS}, \tau)$ representa en $\textcircled{3}$ la energía

consumida en la transmisión celular desde MR a BS en el intervalo de tiempo $\{\tau_c, \tau_{c+1} \dots \tau_{c+m}\}$, y considerando que MR

y BS están separados por d_{MR-BS} en τ . $\sum_{\tau=\tau_c}^{\tau_{c+m}} \tau \cdot P_W$ representa la

energía consumida por la unidad de almacenamiento mientras MR transmite la información a la BS.

La función objetivo ha sido definida junto a 2 restricciones para asegurar que el mensaje (de tamaño F) se transmite completamente en la transmisión D2D (ecuación (2)) y celular (ecuación (3)). TR_{D2D} y TR_{cell} representan la tasa de transmisión D2D y celular respectivamente. La última restricción (ecuación (4)) garantiza que la solución alcanzada completa la transmisión extremo a extremo antes del tiempo

límite impuesto por la aplicación T . El proceso de optimización (representado por \mathcal{G}) puede resumirse como:

$$\left[\tau_0, \tau_{b-1}, \tau_b, \tau_{c-1}, \tau_c, \tau_{c+m}; Opt_X_i, Opt_Y_i \right] = \arg \min \left(\mathcal{G}(F, T, TR_{D2D}, TR_{cell}, E_{D2D}, E_{cell}, P_R, P_W, P_{IDLE}) \right) \quad (5)$$

III. COMUNICACIONES OPORTUNISTAS UTILIZANDO INFORMACIÓN DE CONTEXTO

El estudio llevado a cabo en la sección anterior permite identificar la localización óptima del nodo móvil retransmisor MR, y la localización a la que MR debe iniciar la transmisión celular para minimizar el consumo energético global. Estas localizaciones son útiles para determinar el límite de rendimiento, ya que en un escenario real es altamente improbable que el MR se encuentre en la localización óptima identificada en el instante requerido. Por lo tanto, es necesario diseñar una solución sub-óptima para seleccionar al MR. Esta sección presenta un esquema oportunista alternativo que hace uso de las localizaciones óptimas identificadas en la sección anterior, pero retrasa el comienzo de la comunicación D2D hasta que un MR alcance dicha localización.

El esquema sub-óptimo requiere que SN retrase la comunicación D2D durante t segundos hasta que un MR alcance la localización óptima identificada en la Sección II. La definición de t está sujeta al cumplimiento de las siguientes dos condiciones. Primero es necesario garantizar con cierta probabilidad que al menos un MR alcanzará la localización óptima identificada antes de que transcurra t . Este estudio propone establecer este requisito probabilístico a partir del uso de información de contexto que puede ser extraída de las redes celulares (información estadística acerca de la densidad y la distribución espacial de los nodos dentro de la celda). La segunda condición es que la BS tiene que recibir completamente el mensaje antes del *deadline* T impuesto por la aplicación. Esta condición debe satisfacerse independientemente de que SN agote completamente el tiempo t para encontrar a un MR en la localización óptima identificada. Si las dos condiciones no se cumplen, no sería posible establecer una transmisión MCN oportunista, y SN debería transmitir directamente la información a la BS a través de un enlace celular tradicional.

A. Distribución uniforme de nodos dentro de la celda

Para determinar el valor de t (tiempo que SN necesita retrasar la transmisión D2D para garantizar con cierta probabilidad la llegada de al menos un MR a la localización óptima identificada), este estudio considera primero que los dispositivos móviles están uniformemente distribuidos dentro de la celda. A partir de la distribución de Poisson, la probabilidad de que un MR alcance la localización óptima (Opt_X_i) puede calcularse como:

$$P_{Opt_X_i} = 1 - P(x=0; \mu't) = 1 - \exp(-\mu't), \quad \forall Opt_X_i \in (1, \dots, R) \quad (6)$$

donde μ' representa la tasa media de llegada de MRs a la localización óptima identificada (de hecho a cualquier localización dentro de la celda), y t se corresponde con el tiempo entre llegadas (o el tiempo hasta la próxima llegada de un MR a la localización óptima identificada). μ' se calcula utilizando el número medio de MRs uniformemente distribuidos dentro de la celda de radio R y desplazándose a velocidad v ($\mu' = \mu \cdot v/R$). El tiempo t que garantiza con

probabilidad δ la llegada de al menos un MR a la localización óptima identificada puede expresarse como:

$$t = \frac{R \cdot \ln(1 - \delta)}{-\mu \cdot v} \text{ iff } \exists Y'_i = \arg \min_{\tau'_{b-1} = \tau_{b-1} + t} (\vartheta(\dots)) \quad (7)$$

Como se muestra en (7), t es proporcional al radio de la celda (R) e inversamente proporcional a la densidad espacial media de MRs dentro de la celda (μ/R) y a la velocidad de los nodos (v). Además, t aumenta con la probabilidad que garantiza la presencia del MR en la localización óptima identificada. Es importante notar que t representa el peor de los casos, es decir, el máximo tiempo que SN debería retrasar la transmisión D2D para esperar a que un MR alcance la localización óptima identificada. En este contexto, el tiempo t puede definirse sí y sólo sí (iff) la condición mostrada en (7) se cumple. Esta condición requiere la existencia de una solución sub-óptima Y'_i del problema de optimización (ϑ) presentado en la Sección II, considerando que la transmisión D2D termina en el instante $\tau_{b-1} + t$ (la configuración óptima necesita τ_{b-1}). Si se cumple esta condición es posible establecer el enlace oportunista MCN de 2-saltos. En caso contrario, el SN transmitirá la información directamente a la BS a través del enlace celular directo tradicional.

B. Distribución no-uniforme de nodos dentro de la celda

El tiempo t puede también calcularse cuando la distribución de nodos dentro de la celda es no uniforme. Sin pérdida de generalidad, este estudio considera una distribución en la que la densidad espacial de nodos es mayor cerca de la BS (esta es una asunción común en la literatura ya que esta distribución representa escenarios en los que la BS está desplegada para proveer cobertura a lugares frecuentemente visitados). El modelo matemático de la distribución no-uniforme ha sido representado utilizando una distribución Normal truncada y centrada en la BS. De este modo, la probabilidad de encontrar a un MR en la localización óptima identificada (Opt_X_i) puede calcularse como:

$$P_{Opt_X_i} = \int_{Opt_X_i - \frac{\varepsilon}{2}}^{Opt_X_i + \frac{\varepsilon}{2}} P(x; s, \sigma, a, b) dx \quad (8)$$

donde ε representa la unidad de discretización espacial, y $P(x; s, \sigma, a, b)$ es la distribución Normal truncada (definida entre $x \in [a, b]$) con media s y varianza σ^2 . Considerando que la densidad espacial media de nodos en Opt_X_i es igual a $\mu_{Opt_X_i} = (\mu/R) \cdot P_{Opt_X_i}$, y que la distribución Normal truncada puede discretizarse en múltiples distribuciones de Poisson, el tiempo t que SN necesita retrasar la transmisión D2D para garantizar con probabilidad δ la llegada de al menos un MR a la localización óptima identificada puede calcularse como:

$$t = \frac{R \cdot \ln(1 - \delta)}{-\mu \cdot P_{Opt_X_i} \cdot v} \text{ iff } \exists Y'_i = \arg \min_{\tau'_{b-1} = \tau_{b-1} + t} (\vartheta(\dots)) \quad (9)$$

Es importante notar que (9) depende de $P_{Opt_X_i}$, y por lo tanto de la localización óptima del MR dentro de la celda (a diferencia de cuando los nodos están distribuidos uniformemente dentro de la celda). La definición de (9) está también sujeta al cumplimiento de la condición de que exista una solución sub-óptima del problema de optimización (ϑ) presentado en la Sección II. Si esta condición no se cumple, el SN transmitirá directamente la información a la BS utilizando un enlace celular tradicional.

IV. ESCENARIO DE EVALUACIÓN

La evaluación considera LTE a 2GHz para la transmisión celular, y IEEE 802.11g a 2.4GHz para la transmisión D2D (3GPP considera tanto tecnologías 802.11 como celulares para las comunicaciones D2D). Estas tecnologías han sido seleccionadas por la disponibilidad de modelos. En cualquier caso, las conclusiones extraídas no dependen de la tecnología de acceso radio seleccionada. La tasa de transmisión del enlace celular LTE entre MR y la BS puede calcularse como [3]:

$$TR_{cell}(d) = r(N_{PRB}, I_{MCS}) \cdot (1 - p_{BLER}(N_{PRB}, I_{MCS})) \quad (10)$$

donde $r(N_{PRB}, I_{MCS})$ se define como la tasa máxima instantánea que puede alcanzar un usuario según los recursos asignados (N_{PRB}) y el esquema de codificación y modulación (I_{MCS}). Siguiendo las indicaciones de estudios realizados en el 3GPP, N_{PRB} ha sido fijado a 6. Además, $p_{BLER}(N_{PRB}, I_{MCS})$ es la tasa de bloques erróneos experimentada para los recursos asignados y el esquema MCS utilizado. Este estudio considera un BLER del 10% que representa el objetivo de los valores de CQI (*Channel Quality Indicator*) enviados desde el usuario a la BS. Este trabajo también considera 15 combinaciones de MCS, coincidiendo con los índices disponibles de CQI en LTE, que son utilizados en función a la distancia entre el MR y la BS (MCS más robustos serán utilizados a mayor distancia). Finalmente, la tasa máxima instantánea puede calcularse como $r(N_{PRB}, I_{MCS}) = TBS/T_{TBS}$ donde TBS es el tamaño del bloque de transporte asociado al índice MCS, y T_{TBS} es la duración del TBS (en LTE es igual a 0.5ms).

La tasa de transmisión para el enlace D2D entre SN y MR puede calcularse como [4]:

$$TR_{D2D}(d) = DataRate(d) \cdot Eff \cdot (1 - PER(d)) \quad (11)$$

donde $DataRate$, PER y Eff representa el modo de transmisión de 802.11g [5], la tasa de paquetes erróneos [5], y la eficiencia del canal [4].

El consumo energético en la transmisión entre SN y MR, y entre MR y BS, ha sido modelado utilizando el modelo de propagación para entornos urbanos desarrollado en WINNER [6] (aquí se ha considerado que la potencia de transmisión es la necesaria para garantizar que el nivel de señal en el receptor es igual al umbral requerido para una correcta recepción. Este valor se ha tomado igual a -52dBm). Para el modelado de la energía consumida por las unidades de almacenamiento se ha utilizado el trabajo presentado en [7]. El escenario considera que MR está en línea con SN, y se desplaza hacia la BS con una velocidad de 2m/s. SN necesita transmitir un fichero a la BS de 10Mb (F) y el tiempo límite de la transmisión es de 100s (T).

V. EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO

Esta sección evalúa primero el rendimiento de la técnica sub-óptima propuesta en el peor de los casos, es decir, en el caso de que SN necesite retrasar la transmisión D2D durante todo el tiempo t (en condiciones reales podría ocurrir que MR alcanzase antes la localización óptima identificada). Como se ha mostrado en la Sección III, el tiempo t que garantiza con probabilidad δ (fijado en 0.8 en esta evaluación) la llegada de un MR a la localización óptima identificada depende de la densidad espacial y de la distribución de nodos dentro de la celda. Este estudio considera distribuciones uniforme y no-uniforme de nodos

dentro de la celda y una densidad de nodos igual a $\mu/R=0.1$ MRs/m. En el caso de la distribución no uniforme, esta evaluación considera un valor de σ igual a 300m (esto quiere decir que aprox. 68% de los nodos están situados a menos de 300m de la BS – considerando que el radio de la celda es de 1000m).

La Fig. 2 muestra el consumo energético total para todas las posibles localizaciones de SN dentro del radio de cobertura de la BS. La Fig. 2 muestra los resultados para la transmisión celular directa desde el SN ('1-hop celular'), para la técnica óptima presentada en la Sección 2 ('Optimum') y para la técnica sub-óptima basada en información de contexto en el caso de que la distribución de nodos dentro de la celda sea uniforme ('Context-based - Uniform') o no-uniforme ('Context-based - Non-uniform'). Como se puede apreciar, a pesar de estar considerando el peor caso en el rendimiento de las técnicas sub-óptimas, su consumo energético es sólo ligeramente superior que en el caso de la técnica óptima. De hecho, mientras que la técnica óptima reduce el consumo energético medio comparado con '1-hop celular' en un 97%, la técnica sub-óptima lo reduce en un 95% cuando la distribución de nodos es uniforme, y en un 61% cuando la distribución de nodos es no-uniforme. Estos resultados demuestran los importantes beneficios energéticos que pueden proporcionar las técnicas oportunistas en redes MCN.

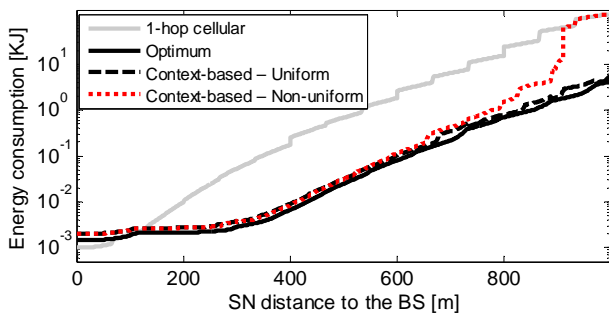


Fig. 2. Consumo energético total.

Esta sección también ha evaluado el rendimiento de las técnicas sub-óptimas propuestas simulando un escenario en el que los nodos se mueven hacia la BS según distribuciones uniformes y no-uniformes. El rendimiento de la técnica sub-óptima propuesta se ha comparado con la comunicación celular tradicional ('1-hop celular') y con la técnica óptima (su rendimiento se ha obtenido del análisis numérico anterior que asume que hay siempre un MR en la localización óptima identificada). Se han analizado dos variantes de la técnica sub-óptima. En la primera de ellas la información de contexto se proporciona por celda ('Context-based - Cell'), mientras que en la segunda la información de contexto se proporciona por anillo ('Context-based - Ring'). Consideramos que la celda está dividida en 15 anillos (pertenecientes a la división de anillos de calidad de LTE). Ambas variantes estiman el tiempo t utilizando la expresión derivada para una distribución uniforme de nodos. En el caso de que la información se proporcione por anillos, la densidad espacial de usuarios (μ/R) es sustituida por la densidad espacial en el anillo (ϕ/r) - siendo ϕ el número medio de nodos en el anillo y r la longitud del anillo en el que la localización óptima identificada está situada. Los resultados mostrados en la Tabla 1 demuestran que el uso de técnicas oportunistas ayuda a reducir el consumo energético en comparación con la comunicación celular tradicional. Los

resultados de la Tabla 1 también muestran que ambas variantes de la técnica sub-óptima alcanzan un rendimiento similar al de la técnica óptima cuando la distribución de nodos dentro de la celda es uniforme (Tabla 1.a). Sin embargo, cuando la densidad de usuarios dentro de la celda es no-uniforme (Tabla 1.b), proveer la información por anillos representa importantes beneficios. Esto es debido a que proporcionar la información por anillos permite adaptar mejor la estimación del tiempo t que debe retrasarse la información (hacerlo con la información de toda la celda resulta en estimaciones incorrectas especialmente al borde de la celda donde la densidad de usuarios es menor).

Tabla 1. Reducción (en %) del consume energético medio total comparado con la comunicación celular directa.

Técnica	$\mu/R=0.1$ MRs/m	Técnica	$\mu/R=0.1$ MRs/m
	$\delta=0.8$		$\delta=0.8$
Context-based - Cell	86.88	Context-based - Cell	48.12
Context-based - Ring	94.51	Context-based - Ring	92.24
Optimum	97.01	Optimum	97.01

VI. CONCLUSIONES

Las redes MCN pueden ayudar a afrontar los retos que han surgido por el crecimiento exponencial del tráfico de datos en las redes celulares. Este estudio propone la integración de esquemas oportunistas en las redes MCN para gestionar tráfico tolerante a retardos. En concreto, este estudio ha propuesto y evaluado un esquema oportunista para redes MCN que hace uso de información de contexto y que puede reducir significativamente (por encima del 90%) el consumo energético en comparación a la comunicación celular directa tradicional. El esquema propuesto explota información de contexto disponible en las redes celulares para definir su operación y alcanzar niveles de rendimiento energético similares a los alcanzados con la técnica óptima (pero irrealizable). El esquema propuesto alcanza su máximo rendimiento cuando la información es provista por anillos en lugar de por celda.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y los fondos FEDER (TEC2011-26109), y la Generalitat Valenciana (ACIF/2010/161).

REFERENCIAS

- [1] J. Gozalvez y B. Coll-Perales, "Experimental Evaluation of Multihop Cellular Networks Using Mobile Relays", *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 7, pp. 122-129, Jul. 2013.
- [2] Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2012-2017. *Cisco White Paper*, Feb. 2013.
- [3] F.D. Calabrese, et al., "Adaptive Transmission Bandwidth Based Packet Scheduling for LTE Uplink" *Proc. of the IEEE VTC Fall*, pp. 1-5, Calgary, Canada, 21-24 Sept. 2008.
- [4] A. Duda, "Understanding the Performance of 802.11 Networks", *Proc. of the IEEE PIMRC*, pp.1-6, Cannes, France, 15-18 Sept. 2008.
- [5] B. Coll-Perales, J. Gozalvez y J. Sanchez-Soriano, "Empirical Performance Models for Peer-to-Peer and Two hops Multi-hop Cellular Networks with Mobile Relays", *Proc. of the ACM PM2HW2N*, pp. 21-28, Barcelona, Spain, 3-8 Nov. 2013.
- [6] WINNER consortium, "D1.1.2 V.1.1. WINNER II channel models", WINNER European Research project Public Deliverable, Nov. 2007.
- [7] B. Zhao y V. Friderikos, "Optimal stopping for energy efficiency with delay constraints in Cognitive Radio networks", *Proc. of the IEEE PIMRC*, pp.820-825, Sydney, Australia, 9-12 Sept. 2012.