

Comunicaciones Oportunistas y Contextuales para Redes Multi-hop Celular con Retransmisores Móviles

Baldomero Coll-Perales ⁽¹⁾, Javier Gozalvez ⁽¹⁾ y Vasilis Friderikos ⁽²⁾

⁽¹⁾ 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

⁽²⁾ CTR, *Center for Telecommunications Research*, King's College London, London, U.K., WC2R 2LS
bcoll@umh.es, j.gozalvez@umh.es, vasilis.friderikos@kcl.ac.uk

Resumen- La creciente demanda de datos y las limitaciones de capacidad de los actuales sistemas celulares representan un verdadero reto para las operadoras de red. Las redes multi-hop celular con retransmisores móviles (*Multi-hop Cellular Networks with Mobile Relays*, MCN-MR) han emergido como una tecnología capaz de abordar estos problemas a través de la integración de las redes celulares y ad-hoc utilizando comunicaciones entre dispositivos (*Device to Device*, D2D). Este trabajo estudia la integración de técnicas oportunistas en redes MCN-MR para incrementar la eficiencia energética de las comunicaciones celulares. En primer lugar este trabajo identifica la configuración óptima de las comunicaciones oportunistas en un escenario MCN-MR de 2 saltos. A partir de estas configuraciones se desarrollan dos novedosas técnicas oportunistas para redes MCN-MR que explotan la comunicación D2D entre dispositivos móviles. Los resultados obtenidos demuestran los importantes beneficios energéticos de la integración de las técnicas oportunistas en redes MCN-MR.

Palabras Clave- Eficiencia energética, comunicaciones oportunistas, comunicaciones contextuales, redes multi-hop celular con retransmisores móviles

I. INTRODUCCIÓN

Las redes de telefonía móvil han experimentado un importante incremento en el tráfico de datos, lo cual representa un verdadero reto para las operadoras de red. Para hacer frente a este incremento en la demanda de tráfico se han desarrollado nuevas tecnologías de acceso radio y técnicas avanzadas de comunicación que han conseguido incrementar la eficiencia espectral. A pesar de los importantes avances logrados, las redes celulares tradicionales podrían no ser capaces de hacer frente a las altas demandas de tráfico de datos previstas. En este contexto, la integración de técnicas distribuidas basadas en retransmisores dentro de los sistemas celulares (a lo que se conoce como redes celulares multi-salto o MCN) ha despertado un gran interés en la comunidad investigadora debido a sus posibles beneficios en términos de capacidad, eficiencia energética, y balanceo de carga [1]. Los beneficios esperados por las redes MCN se basan en la sustitución de enlaces de comunicación de larga distancia entre los terminales móviles y la estación base, y que por lo general se establecen en condiciones de no visión directa (*Non-Line of Sight*, NLOS), por múltiples enlaces de menor distancia con mejores condiciones de comunicación. La introducción de las técnicas de retransmisión en los estándares celulares se ha centrado inicialmente en soluciones con retransmisores fijos (*MCN-Fixed Relay*, MCN-FR). Sin embargo, la consideración de nodos retransmisores móviles en redes

MCN (MCN-MR) ofrece enormes posibilidades de comunicación al explotar los recursos de los dispositivos móviles desplegados de un modo colaborativo y oportunista [2]. Las redes MCN-MR pueden contribuir a la eficiencia energética de los futuros sistemas de comunicaciones móviles a través de la integración de soluciones oportunistas. Los mecanismos oportunistas basan su modo de operación en la movilidad de los nodos y explotan el paradigma 'almacena-transporta & retransmite' (*Store-Carry & Forward*, SCF) para establecer enlaces de comunicación entre dispositivos móviles. Sin embargo, las limitadas oportunidades de contacto entre los dispositivos móviles conllevan un posible incremento del retardo en la transmisión extremo a extremo [3]. La integración de las técnicas oportunista en las redes MCN-MR en las que los dispositivos móviles poseen continuamente conectividad celular representa una opción interesante para incrementar la calidad del servicio, balancear tráfico tolerante a retardos y mejorar la eficiencia energética.

En este contexto, el presente trabajo estudia la integración de técnicas oportunistas en redes multi-hop celular de 2 saltos para reducir el consumo energético de las comunicaciones celulares en el enlace ascendente. En particular, este artículo formula matemáticamente el problema de optimización de la comunicación oportunista MCN-MR de 2 saltos, con el objetivo de identificar la localización óptima del terminal móvil retransmisor y la localización a la que el retransmisor necesita iniciar el reenvío de la información a la estación base con el fin de minimizar el consumo energético. A partir de esta configuración óptima, este trabajo desarrolla también dos técnicas oportunistas que hacen uso de información contextual difundida por la estación base para seleccionar al nodo móvil retransmisor cuando no se pueda garantizar su localización en la ubicación óptima identificada.

El resto de este artículo está organizado del siguiente modo. La Sección II resume los estudios relacionados con la eficiencia energética en redes MCN-MR y en redes que integran técnicas oportunistas. La Sección III presenta el modelo de comunicación oportunista MCN-MR considerado en este trabajo y obtiene las configuraciones óptimas a partir de la formulación matemática del problema. La Sección IV muestra las dos técnicas oportunistas contextuales que se proponen en este trabajo para seleccionar al nodo móvil retransmisor. Finalmente, la Sección V concluye el trabajo resumiendo las principales aportaciones del estudio realizado y señalando los trabajos futuros.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

Diferentes estudios han investigado el impacto de la utilización de retransmisores móviles y de las comunicaciones oportunistas en el consumo energético dentro de un sistema celular. El trabajo presentado en [4] considera un escenario en el que una celda se divide en anillos concéntricos, y sólo los dispositivos móviles dentro del anillo más interno pueden enviar los datos a la estación base. Por otra parte, los dispositivos móviles situados en anillos más externos son los encargados de retransmitir la información a los dispositivos móviles situados en el anillo inmediatamente interior; hasta alcanzar al dispositivo móvil situado en el anillo más interno. El estudio realizado en [4] demuestra que con una adecuada selección del tamaño de los anillos es posible reducir el consumo de energía en comunicaciones MCN con retransmisores móviles si se compara con la transmisión tradicional directa entre el dispositivo móvil y la estación base.

En las redes oportunistas, las rutas multi-hop se establecen a partir de las oportunidades de conectividad y del tiempo de contacto (y entre contactos) de los nodos móviles [3]. Como resultado, los nodos móviles almacenan y transportan la información cuando no existen oportunidades de comunicación, y esperan a futuras oportunidades que pueden llegar por la continua movilidad de los nodos. Aunque este modo de operación puede aumentar los retardos en la transmisión extremo a extremo, ha demostrado una importante reducción del consumo de energía en redes de comunicación inalámbricas multi-hop.

Los beneficios de la integración de las técnicas oportunistas en las redes MCN se demuestran en [5], donde los autores presentan novedosas políticas de enrutamiento que hacen uso de información sobre la movilidad de los retransmisores móviles para reducir el consumo de energía, aumentar la capacidad espacial, reducir la interferencia co-canal, distribuir la carga de tráfico a través de distintas celdas, y desconectar estaciones base infrautilizadas. Los autores de [5] desarrollan políticas de enrutamiento oportunistas mediante la formulación de grafos espacio-temporales finitos de la red, donde los vértices representan la ubicación de los retransmisores móviles en el tiempo, y las aristas los enlaces de comunicación entre los dispositivos móviles. El grafo de la red resultante incluye todas las rutas posibles (incluyendo espacios en los que los terminales móviles almacenan y transportan la información) para la transmisión de la información a la estación base celular. En este estudio, los autores demuestran que cuanto mayor es el tiempo disponible para transmitir la información (i.e. cuanto mayor sea la tolerancia al retardo de las aplicaciones), mayores son los beneficios en términos de eficiencia energética de la integración de las comunicaciones celulares y oportunistas. Los autores de [5] extienden su estudio anterior a redes celulares cognitivas [6] en las que las oportunidades de comunicación con la estación base a través de técnicas oportunistas se limitan a los recursos que encuentran disponibles los ‘usuarios secundarios’ (*Secondary Users*, SU). En [6] se pone de manifiesto además la importancia de considerar el consumo de energía de las unidades de almacenamiento de los retransmisores móviles para el adecuado estudio integral de los mecanismos oportunistas.

III. COMUNICACIONES OPORTUNISTAS EN REDES MCN-MR

Estudios anteriores han demostrado los beneficios energéticos resultantes de la integración de los mecanismos oportunistas en las redes celulares a expensas de los posibles retardos en la comunicación extremo a extremo. Por lo tanto, esta integración ofrece a los terminales móviles la posibilidad de retrasar el envío de la información a la estación base. En este contexto, un aspecto clave es cómo realizar la gestión del tiempo disponible para lograr el resultado deseado; en el caso de este estudio, reducir el consumo de energía.

Este trabajo se centra en un escenario MCN-MR de 2 saltos, en el que el nodo de origen (*Source Node*, SN) es estático y tiene información que transmitir a la estación base (*Base Station*, BS). Para ello, el SN puede explotar la cooperación de nodos retransmisores móviles (*Mobile Relay*, MR) capaces de almacenar, transportar y retransmitir la información (Fig. 1). En este contexto, el tiempo necesario para transmitir la información desde el SN a la BS se calcula en base a: 1) el tiempo necesario para la transmisión ad-hoc desde el SN al MR (*D2D tx*), 2) el tiempo que el MR almacena y transporta la información (*Store-Carry & Forward*, SCF), y 3) el tiempo necesario para que el MR transmita la información a la BS (*Celular tx*). Es importante señalar que el tiempo necesario para la transmisión *D2D tx* desde el SN al MR depende de la localización del MR (o dicho de otro modo, de la distancia entre el SN y el MR), al igual que el tiempo necesario para la transmisión *Celular tx* depende del lugar en el que el MR inicie la transmisión celular a la BS. En este contexto, este trabajo se centra inicialmente en la estimación de estos dos lugares, con el objetivo final de reducir el consumo total de energía de la comunicación MCN-MR oportunista de 2 saltos.

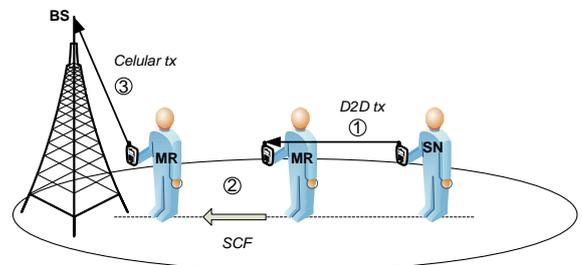


Fig. 1. Escenario de la comunicación MCN-MR oportunista de 2 saltos.

A. Formulación matemática del problema

Para determinar la configuración óptima que permite reducir al mínimo el consumo total de energía de la comunicación MCN-MR oportunista de 2 saltos se ha formulado un problema de optimización multi-objetivo con restricciones. Para ello, se ha definido la función objetivo que se muestra en (1) junto con dos restricciones (2) y (3). Una restricción intrínseca del problema es la necesidad de que la BS reciba la información dentro del tiempo máximo permitido T . Este tiempo límite se ha discretizado en (1) como $\{\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_T\}$. La definición de la función objetivo tiene en cuenta la energía consumida por la transmisión *D2D tx* ①, el proceso de almacenamiento, transporte y reenvío (SCF) ② y la transmisión celular *Celular tx* ③. $E_{ad hoc}$ es la energía consumida en la transmisión D2D, y es una función que depende de la distancia entre el SN y el MR y el tiempo necesario para la transmisión D2D. P_R , P_W y P_{IDLE} están relacionadas con la energía consumida en el proceso de

almacenar y transportar la información en los dispositivos móviles. E_{cell} representa la energía consumida en la transmisión celular, y es una función que depende de la distancia entre el MR y la BS y el tiempo necesario para la transmisión celular. La función objetivo incluye dos restricciones para asegurar que el mensaje (de tamaño F) sea completamente transmitido en la transmisión celular (3) y en la transmisión D2D (2). $R_{ad hoc}$ y R_{cell} representan las tasas de transmisión de los enlaces ad-hoc y celular, respectivamente. En este contexto, la identificación de la ubicación óptima del retransmisor móvil para que de inicio la transmisión D2D, y la ubicación en la que el MR tiene que empezar a transmitir la información a la red celular, es equivalente a encontrar τ_{b-1} , τ_{c-1} y τ_{c+m} en (1).

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

$st :$

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

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

A continuación se detallan los modelos utilizados en este trabajo en cada uno de los procesos involucrados en la comunicación MCN-MR oportunista de 2 saltos:

1) *D2D tx*. Las pérdidas de propagación entre el SN y el MR se han modelado utilizando el modelo determinista de 2 rayos. En este contexto, la energía consumida en las transmisiones ad-hoc entre dispositivos móviles puede expresarse como [5]:

$$E_{ad hoc}(d) = \begin{cases} (e_r + e_t + e_{LOS} \cdot d^2) \cdot R_{ad hoc} & \text{si } d < d_{brake} \\ (e_r + e_t + e_{MP} \cdot d^4) \cdot R_{ad hoc} & \text{si } d \geq d_{brake} \end{cases} \quad (4)$$

donde e_t y e_r representan el consumo de energía por bit en el transmisor y la electrónica del receptor, respectivamente, y $R_{ad hoc}$ es la tasa de transmisión de datos en el enlace ad-hoc. La distancia entre el transmisor y el receptor es d , y $d_{brake} = 4\pi h_T h_R / \lambda$ es la distancia crítica (h_T y h_R representan la altura de las antenas de los dispositivos móviles transmisor y receptor, y λ es la longitud de onda de la frecuencia portadora, todos en m). Para $d < d_{brake}$, el parámetro e_{LOS} representa el consumo de energía por bit cuando las condiciones de propagación son de visión directa (LOS). e_{MP} representa el consumo de energía por bit cuando la señal llega al receptor a través de múltiples rutas (*MultiPath*, MP) para $d \geq d_{brake}$. Este modelo de energía considera que la potencia de transmisión (P_{LOS} y P_{MP}) empleada por el transmisor es la necesaria para garantizar que el nivel de señal en el receptor sea igual al umbral de potencia requerido (P_r) para que la comunicación pueda ser considerada exitosa. Por este motivo, P_{LOS} y P_{MP} pueden expresarse como se muestra a continuación [5]:

$$P_{LOS} = \frac{P_r (4\pi)^2}{\lambda^2} ; P_{MP} = \frac{P_r}{h_t^2 h_r^2} \quad (5)$$

y e_{LOS} y e_{MP} equivalen a $P_{LOS}/R_{ad hoc}$ and $P_{MP}/R_{ad hoc}$, respectivamente.

La comunicación ad-hoc entre los terminales SN y MR se lleva a cabo utilizando la tecnología IEEE 802.11g a 2.4GHz (el estudio podría reproducirse para otras tecnologías de acceso radio). La tasa de transmisión de IEEE 802.11g puede modelarse como [7]:

$$R_{ad hoc}(d) = DataRate(d) \cdot Eff \cdot (1 - PER(d)) \quad (6)$$

donde $DataRate$ representa el modo de transmisión ad-hoc de IEEE 802.11g:

$$DataRate(d) = \begin{cases} 54 & d < 78.47m \\ \frac{54}{\frac{1}{78.47} - \frac{1}{270.85}} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{270.85} \right) & 78.47m \leq d < 270.85m \\ 0 & 270.85 \leq d \end{cases} \quad (7)$$

PER (*Packet Error Ratio*) es la tasa experimentada de paquetes IEEE 802.11g erróneos¹:

$$PER(d) = \frac{0.75}{1 + e^{-0.019 \cdot (d - 115.15)}} \quad (8)$$

y Eff es la eficiencia del canal IEEE 802.11g que depende del tiempo de transmisión de los paquetes de datos (t_d) y paquetes ACK (t_{ack}), el periodo de contención (t_{cont}), y de los tiempos de guarda entre tramas (*DIFS* y *SIFS*) [7]:

$$Eff = \frac{t_d}{DIFS + t_{cont} + t_d + SIFS + t_{ack}} \quad (9)$$

2) *Almacenamiento, transporte y reenvío (SCF)*. Como se sugiere en [6], este trabajo considera la energía consumida por el proceso de almacenamiento y transporte de la información. Los dispositivos móviles almacenan automáticamente los paquetes de datos recibidos por la interfaz inalámbrica en la unidad de almacenamiento principal del sistema DRAM. La información podría ser transferida a las unidades de almacenamiento internas tales como la memoria flash NAND si se considera apropiado, dado su menor consumo de energía (el tiempo que se almacena la información, y la velocidad de transferencia y el coste de energía son factores a evaluar). Sin embargo, la información debe ser transferida de nuevo a la memoria DRAM cuando el dispositivo inicia el proceso de reenvío. Este trabajo considera que la información siempre se transfiere de DRAM a NAND flash. En este contexto, P_R representa la potencia consumida por las unidades de almacenamiento DRAM y NAND flash durante la lectura (R) y escritura (W) de la información, así como la energía consumida por la transferencia de la información desde la DRAM a la memoria flash NAND ($Transf_DF$). P_{IDLE} incluye la energía consumida por la memoria flash NAND durante el almacenamiento de la información en estado inactivo o *idle*, y la potencia consumida por la DRAM que se encuentra en estado 'semi-activo' (*Idle self-refresh*). Por último, P_W es la potencia consumida por las dos unidades de almacenamiento cuando transfieren la información de nuevo a la memoria DRAM para la transmisión.

3) *Celular tx*. Las pérdidas de propagación en la transmisión celular también se han modelado utilizando el

¹ Los modelos IEEE 802.11g $DataRate$ y PER han sido obtenidos por los autores mediante una extensa campaña de medidas [8].

modelo de dos rayos descrito en *D2D tx*. El consumo de energía de la comunicación entre el MR y la BS se modela utilizando (4), pero sustituyendo $R_{ad hoc}$ por R_{cell} . Además, las alturas de las antenas y de longitud de onda se deben actualizar en (4). Este estudio considera HSPA a 2,1 GHz para la transmisión celular entre el MR y la BS (el estudio podría ser reproducido para otras tecnologías de acceso radio). Para el modelado de la tasa de transmisión de datos celular se ha supuesto que el sistema celular adapta su funcionamiento a las condiciones del canal radio utilizando modulación y codificación adaptativa (*Adaptive Modulation and Coding*, AMC) y mecanismos de retransmisión avanzados (*Automatic Repeat Request*, ARQ). De modo general, la tasa de transmisión de datos celular se puede modelar teniendo en cuenta anillos concéntricos [9] como:

$$R_{cell}(d) = k \cdot C \cdot \log_2(M(d)) \cdot BW \quad (10)$$

donde BW , M y C representan el ancho de banda del sistema, el tamaño de la constelación de la modulación y la tasa de codificación, respectivamente. M y C se seleccionan de acuerdo a la distancia entre el dispositivo móvil y la BS (cuanto mayor sea la distancia, menor es la intensidad de la señal medida en el dispositivo móvil, y por lo tanto menor deberá ser el esquema de modulación/codificación). k representa un factor de atenuación que limita la tasa de transmisión de datos celular, e incluye, entre otros, el efecto de los fallos en la transmisión, retransmisiones e interferencias [9].

B. Investigación Numérica

La resolución numérica de la función objetivo que se muestra en (1) se ha realizado teniendo en cuenta los parámetros de configuración del escenario que se recogen en la Tabla I. El estudio considera una celda con un radio de 1000m. La celda está dividida en siete anillos equidistantes y concéntricos definidos por los esquemas AMC que se muestran en la Tabla I. La tasa de transmisión celular se considera que disminuye con el aumento de la distancia entre el MR y la BS. En el primer anillo (más cercano a la BS) posee una tasa de datos HSUPA máxima de 7Mbps en el enlace ascendente. Los valores de consumo de energía de las unidades de almacenamiento flash NAND y DRAM se han obtenido a partir de [10], y los valores de e_r , e_t y P_r de [5]. El mensaje que el nodo fuente estático tiene que transmitir a la BS tiene un tamaño nominal de 10 Mb, y el tiempo disponible para completar la transmisión se ha establecido en 40s. Ejemplo de este tipo de aplicación podría ser: actualizaciones en redes sociales, almacenamiento de

ficheros en ‘la nube’ o envío de correos poco urgentes. En el escenario se considera que el MR está en línea con el nodo fuente, y avanza hacia la BS con una velocidad de 2m/s.

La Fig. 2 muestra la localización óptima del MR en función de la distancia entre el SN y la BS. Dicha localización se ha representado como la distancia entre el SN y el MR. A modo de ejemplo, cuando el SN se encuentra a 400m de distancia de la BS, la función objetivo desarrollada en este trabajo determina que, con el fin de reducir al mínimo el consumo de energía, el MR debe estar idealmente situado a 120m de distancia del SN en la dirección de la BS. La Fig. 2 muestra que la distancia óptima desde el SN al MR que minimiza el consumo de energía aumenta con la distancia entre el SN y la BS. Esto es debido a que el incremento de la distancia entre el SN y el MR resulta en que el MR esté más cerca de la BS y por lo tanto se consigue disminuir el consumo energético de la transmisión celular. Por otro lado, la energía consumida en la transmisión D2D desde el SN al MR aumenta a medida que el MR está más cerca de la BS. En este contexto, la distancia óptima entre el SN y el MR sólo aumenta cuando el ahorro de energía del proceso de almacenar y transportar la información llevado a cabo por el MR compensa el aumento en el consumo de energía en la transmisión D2D. Los picos que se muestran en la Fig. 2 se corresponden con situaciones en las que el MR se desplaza hacia la BS y se aproxima a un anillo con una mayor tasa de transmisión celular; el uso de anillos con tasas de transmisión superiores reduce el consumo de energía.

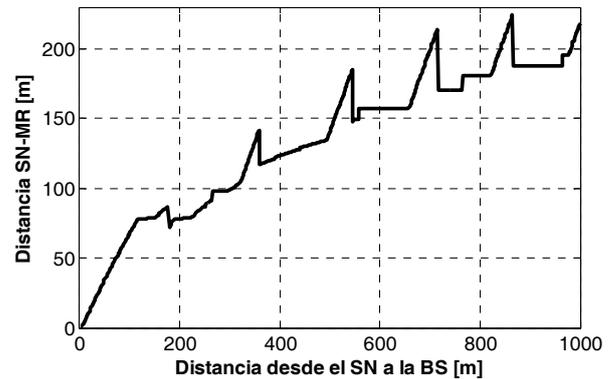


Fig. 2. *D2D tx*: localización óptima del MR.

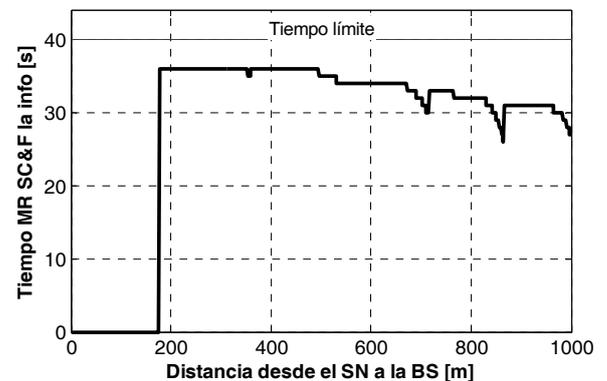


Fig. 3. *Store-carry & Forward (SC&F)*: tiempo que el MR almacena y transporta la información mientras se desplaza hacia la BS.

TABLA I.

PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DEL ESCENARIO

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
F	10Mb	T	40s
R	1000m	v	2m/s
h_{SN}, h_{MR}, h_{BS}	1.5m, 1.5m, 10m	$Max\ UL\ Thr$	7Mbps
e_t, e_r	50×10^{-9} J/b	P_r	-52dBm
$DRAM\ P_R, P_W, P_{Idle_self-refresh}$	252mW, 252mW, 1.35mW	AMC	BPSK ($r=1/3$) QPSK ($r=1/3, 1/2, 2/3$) 16QAM ($r= 1/2, 2/3, 5/6$)
$NAND\ E_{ffReads}, E_{ffWrite}, P_{Idle}$	1.83nJ/b, 11.92nJ/b,	$Transf_{DF}, Transf_{EF}$	4.85 MiB/s, 927.1 KiB/s

La Fig. 3 muestra el tiempo que el MR necesita almacenar y transportar (SC&F) la información en su desplazamiento hacia la BS desde la localización identificada en la Fig. 2. Siguiendo el ejemplo anterior, el MR óptimo situado a 125m de distancia del SN (cuando la distancia SN-

BS es de 400m) necesita almacenar y transportar la información durante 36s antes de enviar la información a la BS. Los resultados obtenidos indican que cuando el SN está cerca de la BS (en el anillo con mayor tasa de transmisión celular), el MR seleccionado no necesita almacenar y transportar la información. En este caso, el MR debe retransmitir la información a la BS tan pronto como la reciba del SN. Esto es debido a que la energía consumida en estos lugares por el proceso de almacenar y transportar la información no compensa el ahorro que podría conseguirse por transmitir más cerca de la BS. A medida que la distancia desde el SN a la BS se incrementa, el MR seleccionado debe almacenar y transportar la información para que se pueda llevar a cabo la comunicación celular con la BS desde un anillo con una tasa de transmisión superior a la que se encontraba inicialmente el MR. Cuando el SN se va acercando al borde de la celda, el tiempo que el MR debe almacenar y transportar la información disminuye debido al incremento en el tiempo necesario para completar la transmisión D2D (Fig. 2) y la transmisión celular (Fig. 4). La Fig. 4 muestra el tiempo que el MR seleccionado necesita para transmitir la información a la BS utilizando la interfaz radio celular ('2-saltos MCN (Opt localización MR)').

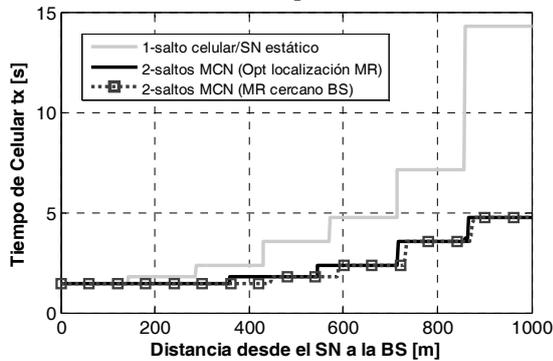


Fig. 4. Celular tx: tiempo que el MR necesita para transmitir la info a la BS.

Las configuraciones óptimas² ilustradas en las Figs. 2, 3 y 4 resultan en los niveles de consumo energético (en escala logarítmica) que se muestran en la Fig. 5 ('2-saltos MCN (Opt localización MR)'). La Fig. 5 también muestra los niveles de consumo energético medidos en el SN estático si éste comunicase directamente con la BS a través de la interfaz radio celular ('1-salto celular/ SN estático'). Los resultados obtenidos demuestran que la configuración óptima de la comunicación MCN-MR oportunista de 2 saltos resulta en significativos beneficios energéticos en comparación con las transmisiones directas celulares desde el SN a la BS. El ahorro energético aumenta con la distancia entre el SN y la BS: desde el 61% cuando el SN está a 200m de distancia de la BS al 80% cuando está situado al borde de la celda. La Fig. 5 deja patente también que cuando el SN está cerca de la BS no es energéticamente eficiente transmitir a través de un enlace MCN-MR de 2-saltos. Los resultados que se muestran en la Fig. 5 también consideran el caso en el que el SN es móvil y puede almacenar, transportar y transmitir la información a la BS sin utilizar un MR ('1-salto celular (Opt SCF)'). En este caso, la función objetivo presentada en este trabajo proporcionaría la ubicación óptima a la que el SN móvil debe comenzar la transmisión de la información a la

BS. Los beneficios energéticos del proceso de almacenar y transportar la información en la comunicación de 1 salto se demuestran en la Fig. 5 si se comparan los resultados obtenidos con los de la comunicación directa desde el SN estático (en media la reducción del consumo energético es del 27%). Sin embargo, la comunicación MCN-MR oportunista de 2-saltos supera estos beneficios energéticos, excepto para distancias muy cortas entre el SN y la BS. Los resultados obtenidos demuestran claramente el potencial de las comunicaciones MCN-MR oportunistas de 2 saltos para reducir el consumo de energía en servicios/aplicaciones tolerantes a retrasos. Sin embargo, este potencial depende en gran medida de la correcta selección de la localización del MR y la localización desde la que el MR debe comenzar la transmisión de la información a la BS. Para demostrar esta dependencia, este trabajo ha evaluado también la energía consumida en el caso de una comunicación MCN-MR oportunista de 2 saltos en la que el MR seleccionado es aquel que se encuentra lo más cerca posible a la BS ('2-saltos MCN (MR cercano BS)'). Esta configuración minimiza el tiempo necesario para enviar la información a la BS (Fig. 4), pero a costa del incremento en los niveles de consumo energético total que se muestran en la Fig. 5.

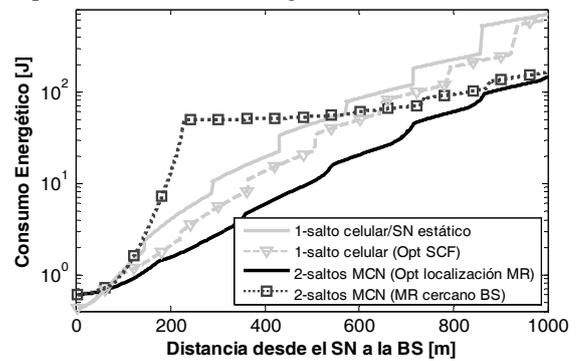


Fig. 5. Energía consumida total.

IV. TÉCNICAS CONTEXTUALES PARA SELECCIONAR AL MR

El estudio llevado a cabo en la sección anterior ha permitido obtener la configuración óptima de la comunicación MCN-MR oportunista de 2 saltos. En particular, el estudio ha permitido identificar la localización óptima del nodo móvil retransmisor MR y la localización a la que el MR debe iniciar la retransmisión de la información a la BS para minimizar el consumo energético global. Estas configuraciones óptimas han de considerarse como límites del rendimiento. Esto es así puesto que podría darse el caso de que en el momento de iniciar la comunicación el SN no fuese capaz de encontrar ningún MR en la localización óptima identificada. Por este motivo, estas localizaciones deberían considerarse como puntos de referencia desde los que buscar al nodo móvil retransmisor. En este contexto, esta sección presenta 2 técnicas oportunistas contextuales para la selección del nodo retransmisor. Estas técnicas se basan en las configuraciones óptimas obtenidas a partir del proceso de optimización presentado en la sección anterior, y además, hacen uso de información contextual proporcionada por la BS a través de sus mecanismos de señalización para identificar límites espacio-temporales en los que garantizar la presencia de un MR.

² La localización del MR y la localización en la cual el MR debe iniciar la transmisión de la información a la BS.

A. Incrementar área de comunicación D2D

La primera propuesta consiste en incrementar el área de búsqueda del MR alrededor de la localización óptima identificada. Un ejemplo de esta propuesta se muestra en la Fig. 6, en la que también se ha incluido la configuración óptima de la comunicación MCN-MR oportunista de 2 saltos. La configuración óptima indica que la comunicación D2D desde el nodo fuente SN_i ha de realizarse con un MR situado en X_i (esta comunicación se completaría en el instante temporal τ_{b-1}). El MR almacena y transporta la información hasta el instante temporal τ_{c-1} e inicia la transmisión celular con la BS cuando alcanza la localización Y_i . Puesto que SN_i podría no encontrar a ningún MR en X_i en el momento de iniciar la transmisión D2D, la estrategia que se propone consiste en seleccionar un nodo retransmisor MR que se encuentre en un punto cercano de la localización óptima. Para ello se define un radio de búsqueda alrededor de X_i de tal modo que garantiza con cierta probabilidad la presencia de un MR. El hecho de seleccionar al MR en una localización distinta a la óptima daría lugar a una modificación en el resto de la configuración de la comunicación. Por ejemplo, en la Fig. 6, el MR seleccionado está situado en X'_i (más alejado de SN_i que X_i). El MR seleccionado inicia la transmisión celular con la BS a una menor distancia de la BS (localización Y'_i) si se compara con la configuración óptima debido al mayor avance logrado en la comunicación D2D.

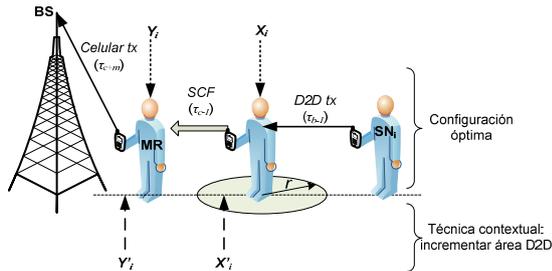


Fig. 6. Técnica contextual para selección de MR: incrementar área D2D.

El principal objetivo en el funcionamiento de esta técnica reside en la determinación del área en la que buscar al MR (o lo que es equivalente, el radio r desde la localización óptima). Este área debe garantizar con probabilidad δ la presencia de al menos un MR. El cálculo de r depende de la densidad y de la distribución de los MR en la celda. Este trabajo ha considerado que los nodos están distribuidos según una distribución homogénea de Poisson. En general, la distribución de Poisson puede expresarse como:

$$P(x; \lambda \cdot d) = \frac{(\lambda \cdot d)^x \cdot \exp(-\lambda \cdot d)}{x!}, \quad x = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

donde x representa el número de ‘éxitos’ y λ el número medio de ‘éxitos’ por unidad de tiempo/distancia/área/etc. d representa la magnitud de interés. Para el escenario bajo estudio en este trabajo, y considerando que en media hay μ MRs en la celda de radio R , el número medio de MRs por unidad de distancia puede calcularse como $\lambda = \mu/R$. Por lo tanto, la probabilidad de encontrar al menos un MR alrededor de la localización óptima X_i , denotado por P_{X_i} , equivale a 1 menos la probabilidad de no encontrar a ningún MR (i.e. $x=0$):

$$P_{X_i} = P\left(x > 0; \frac{\mu}{R} \cdot d\right) = 1 - P\left(x = 0; \frac{\mu}{R} \cdot d\right) = 1 - \frac{\left(\frac{\mu}{R} \cdot d\right)^0 \cdot \exp\left(-\frac{\mu}{R} \cdot d\right)}{0!} = 1 - \exp\left(-\frac{\mu}{R} \cdot d\right), \quad \forall X_i \in (1, \dots, R) \quad (12)$$

Es importante resaltar que la expresión obtenida en (12) es válida para cualquier localización de X_i dentro de la celda. Para identificar el radio alrededor de X_i , la expresión (12) puede modificarse usando el límite de la probabilidad en la que se quiere garantizar la presencia del MR (i.e. δ) del siguiente modo:

$$P_{X_i} = 1 - \exp\left(-\frac{\mu}{R} \cdot d\right) \geq \delta; \quad r \geq \frac{R \cdot \ln(1 - \delta)}{-2 \cdot \mu} \quad (13)$$

donde se ha utilizado que $d=2r$.

Como se puede apreciar en (13), el radio r del área donde garantizar la presencia del MR es proporcional al radio de la celda R e inversamente proporcional al número medio de MRs en la celda μ . Además, r incrementa a medida que se quiere garantizar la presencia de un MR (δ).

Una vez obtenido r y basándonos en la formulación matemática presentada en la Sección III.A es posible obtener la configuración que resulta de la comunicación MCN-MR oportunista de 2 saltos si el MR es seleccionado dentro del área de búsqueda. En este caso, la localización del MR (i.e. X'_i) está limitada dentro del área definida alrededor de la localización óptima (X_i) y radio r ; la cual se expresa como $X'_i \in o(X_i, r)$. De este modo, la configuración que minimiza el problema formulado en la Sección III.A (9) ³ puede calcularse como:

$$\left[\tau'_{b-1}, \tau'_{c-1}, \tau'_{c+m}, X'_i, Y'_i\right] = \arg \min_{X'_i \in o(X_i, r)} \left(\mathcal{G}(F, T, R_{adhoc}, R_{cell}, E_{adhoc}, E_{cell}, P_R, P_W, P_{IDLE})\right) \quad (14)$$

Es importante notar que la resolución de (14) proporciona la solución óptima puesto que la nueva restricción $X'_i \in o(X_i, r)$ la incluye. En este contexto, el objetivo de este estudio es conocer el peor rendimiento (concepto de ‘*maximin*’) de entre todas las posibles localizaciones del MR dentro de $o(X_i, r)$ (i.e. $\forall X'_i \in o(X_i, r)$). Esto puede expresarse como:

$$\left[\tau'_{b-1}, \tau'_{c-1}, \tau'_{c+m}, X'_i, Y'_i\right] = \arg \max \left(\mathcal{G} \left(\arg \min_{\forall X'_i \in o(X_i, r)} \mathcal{G}(\dots) \right) \right) \quad (15)$$

B. Retrasar la transmisión D2D

La segunda propuesta consiste en retrasar la transmisión D2D el tiempo necesario que garantice que un MR pasa sobre la localización óptima identificada. La Fig. 7 ilustra un ejemplo de esta segunda propuesta junto con la configuración óptima de la comunicación MCN-MR oportunista de 2 saltos. La transmisión D2D se lleva a cabo con un MR situado en la localización óptima X_i . Sin embargo, para garantizar la presencia del MR en X_i la transmisión D2D se ha retrasado t unidades de tiempo y por este motivo la D2D tx se completa en $\tau_{b-1} + t$. La Fig. 7 también muestra como el tiempo añadido a la transmisión D2D resulta en una modificación en la localización en la que el MR inicia la transmisión celular si se compara con la configuración óptima. Por este motivo, Y'_i se ha situado más alejado de la BS.

³ \mathcal{G} representa la función objetivo definida en (1) junto con las restricciones (2) y (3) que como se mostró dependen de los parámetros F, T, R_{adhoc} , etc.

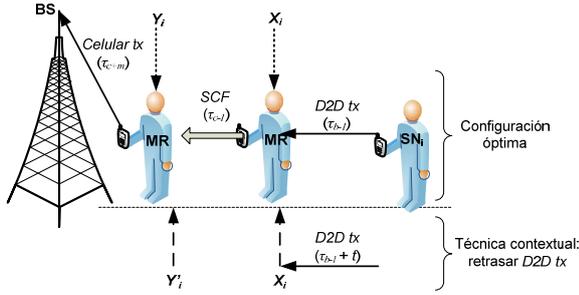


Fig. 7. Técnica contextual para selección de MR: retrasar D2D tx.

En esta segunda técnica, el objetivo clave es por lo tanto determinar el tiempo t que ha de retrasarse la transmisión D2D para garantizar con cierta probabilidad δ que al menos un MR alcanza la localización óptima identificada. El cálculo de t depende de la densidad de nodos en el escenario y de su distribución, y como se ha indicado en la sección anterior este trabajo considera que los nodos están distribuidos siguiendo una distribución homogénea de Poisson. La distribución de Poisson se definió en (11) – en este caso la magnitud de interés se ha definido como t . La tasa media de llegada de MRs al escenario puede calcularse como $\mu' = \mu v/R$, siendo μ el número medio de MR en la celda, v la velocidad de desplazamiento de los MRs y R el radio de la celda. Realizando un desarrollo similar al llevado a cabo para el cálculo de r en la técnica anterior, es posible calcular la probabilidad de que al menos un MR alcance la localización X_i antes de que transcurra el tiempo t como:

$$P_{X_i} = P(x > 0; \mu' t) = 1 - P(x = 0; \mu' t) = 1 - \frac{(\mu' t)^0 \cdot \exp(-\mu' t)}{0!} = 1 - \exp(-\mu' t), \quad \forall X_i \in (1, \dots, R) \quad (16)$$

Utilizando la expresión (16), el tiempo t que garantiza con probabilidad δ la presencia de un MR en la localización óptima X_i puede calcularse como:

$$P_{X_i} = 1 - \exp(-\mu' t) \geq \delta; \quad t \geq \frac{R \cdot \ln(1 - \delta)}{-\mu \cdot v} \quad (17)$$

Como se muestra en (17), el retraso en la transmisión D2D es independiente de la localización óptima del MR dentro de la celda. También se puede apreciar como t es directamente proporcional a R e inversamente proporcional al número medio de MRs en la celda y a la velocidad v de los MRs. Además, t se incrementa a medida que lo hace el parámetro δ .

La configuración óptima que resulta de la comunicación MCN-MR oportunista de 2 saltos en la que el MR se selecciona transcurridos t instantes de tiempo en la localización óptima puede calcularse como:

$$[\tau_{b-1} + t, \tau'_{c-1}, \tau'_{c+m}, X_i, Y'_i] = \arg \min_{\tau_{b-1} = \tau_b + t} (\mathcal{G}(F, T, R_{adhoc}, R_{cell}, E_{adhoc}, E_{cell}, P_R, P_W, P_{IDLE})) \quad (18)$$

donde al problema original \mathcal{G} se ha añadido la restricción del retardo t en la transmisión D2D inicial ($\tau'_{b-1} = \tau_{b-1} + t$). Esto podría resultar en una modificación del tiempo que el MR almacena y transporta la información (τ'_{c-1}), y el tiempo necesario para la transmisión celular o lugar en el que se inicia la transmisión celular con la BS (τ'_{c+m} ó Y'_i). La transmisión D2D se lleva a cabo con el MR situado en X_i .

C. Evaluación numérica

El estudio de las técnicas contextuales para la selección del MR de la comunicación MCN-MR oportunista de 2 saltos propuestas se ha llevado a cabo en el mismo escenario en el que se evaluó la configuración óptima, y cuyos parámetros se resumen en la Tabla I. Además, se ha considerado que los MRs están distribuidos dentro del escenario según una distribución homogénea de Poisson con 50 y 100 MRs de media dentro de la celda. Por último, se ha fijado el valor de δ igual a 0.9.

Para este escenario, y para las distintas densidades de nodos, es posible calcular el radio alrededor de la localización óptima y el tiempo que ha de retrasarse la transmisión D2D para garantizar la presencia de un MR en la localización óptima a partir de las expresiones (13) y (17), respectivamente. El resultado es que cuando la densidad de MR distribuidos homogéneamente es igual a 50, el radio de búsqueda ha de incrementarse 24m. Cuando la densidad de MRs es de 100, el radio de búsqueda se reduce a 12m. Los resultados obtenidos a partir del proceso de optimización (15) demuestran que el peor rendimiento de la técnica se obtiene cuando el MR se encuentra en el límite del radio de búsqueda. Por lo tanto, el rendimiento de esta técnica mejoraría a medida que se seleccione al MR lo más próximo posible de la localización óptima. Para los parámetros utilizados en el escenario, el tiempo límite (17) que el nodo SN ha de esperar para que un MR alcance la localización óptima es de 12s y 24s cuando la densidad de nodos en el escenario es de 100 y 50 MR respectivamente.

Como resultado del cambio de localización del MR en la técnica que incrementa el área de comunicación D2D o del retraso añadido a la comunicación D2D, el MR seleccionado tiene que ajustar los restantes mecanismos de comunicación y de red si se compara con la configuración óptima obtenida en la Sección III. La Fig. 8 muestra el tiempo que el MR seleccionado tiene que almacenar y transportar la información hacia la BS. Al igual que ocurría con la configuración óptima, el MR seleccionado con las técnicas contextuales no tiene que almacenar y transportar la información cuando el nodo fuente SN se encuentra próximo a la BS. En la figura también se muestra como la técnica que retrasa la transmisión D2D ha reducido considerablemente el tiempo que el MR tiene que almacenar y transportar la información hacia la BS debido al tiempo empleado en esperar a que el MR alcance la localización óptima. Por ejemplo, para el escenario en el que la densidad media de nodos es de 50 ('2-saltos MCN (RetrasoD2D-P(50))'), el MR seleccionado por el SN situado a 400m tiene que almacenar y transportar la información durante 12s comparado con los 36s en la configuración óptima ('2-saltos MCN (Opt localización MR)'). Este hecho resulta en que el MR inicia la comunicación con la BS más alejado y por lo tanto la transmisión celular requiere mayor tiempo, tal y como se muestra en la Fig. 9.a. Cuando la densidad de MRs es de 100, el tiempo que el MR seleccionado almacena y transporta la información se incrementa a 24s (por el menor tiempo que hay que esperar a que el MR alcance la localización óptima) y por lo tanto se reduce *Celular tx* (Fig. 9.b). Por otro lado, en la técnica que basa su modo de operación en incrementar el área de comunicación D2D no se aprecian diferencias significativas en el tiempo que el MR almacena y transporta la información en comparación con la

configuración óptima. Esto es debido a que en este caso la transmisión D2D no se retrasa y las pequeñas diferencias de tiempo se deben a la variación de la localización del MR con respecto a la localización óptima (si se comparan las Fig. 8.a y 8.b se puede apreciar como las diferencias se reducen al incrementar la densidad de MRs en el escenario por la reducción del radio de búsqueda de MR).

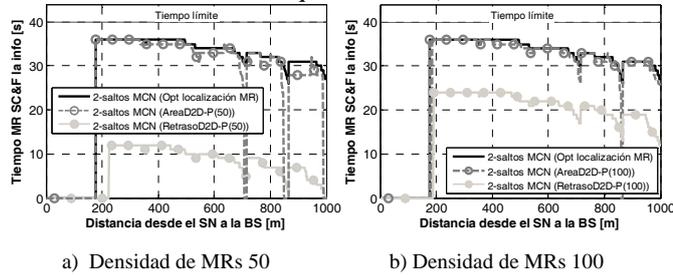


Fig. 8. SCF: tiempo que el MR almacena y transporta la información cuando los nodos están distribuidos según Poisson.

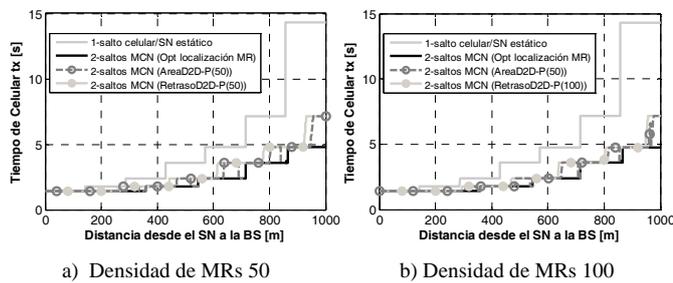


Fig. 9. Tx celular: tiempo que el MR necesita para transmitir la información a la BS cuando los nodos están distribuidos según Poisson.

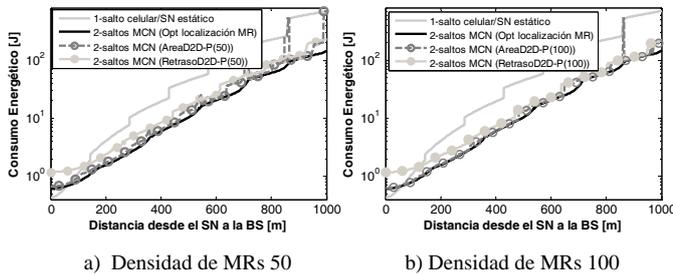


Fig. 10. Energía consumida total. Nodos distribuidos según Poisson.

Las configuraciones resultantes de las técnicas contextuales para la selección del MR que se muestran en las Figs. 8 y 9 resultan en los niveles de consumo energético total que se muestran en la Fig. 10. La Fig.10 también muestra el consumo energético de la configuración óptima ('2-saltos MCN (Opt localización MR)') que como se puede apreciar sigue siendo la comunicación MCN-MR oportunista de 2-saltos que minimiza el consumo energético. La técnica contextual que incrementa el área de comunicación D2D mejora el rendimiento de la técnica que retrasa la comunicación D2D cuando el nodo SN está cerca de la BS. Esto es debido a que es energéticamente ineficiente retrasar la comunicación con la BS cuando el SN está cerca de la BS, tal y como se demostró en la Sección III. Sin embargo, a medida que el SN se aleja de la BS las diferencias entre las dos técnicas se reducen. Como se puede apreciar, el rendimiento de ambas técnicas está próximo al logrado con la configuración óptima, reduciendo considerablemente el consumo energético medido si la transmisión se realiza directamente desde el SN estático a la BS. Por ejemplo, para una densidad de MRs igual a 100, el ahorro energético es en

media del 60% y del 45% para las técnicas oportunistas que incrementan el área D2D y retrasan la transmisión D2D respectivamente.

V. CONCLUSIONES

Este trabajo ha investigado el potencial de la integración de técnicas oportunistas en redes MCN-MR para mejorar la eficiencia energética de las comunicaciones celulares en tráfico tolerante a retardos. El estudio se ha centrado en un escenario MCN-MR de 2 saltos y ha formulado analíticamente el problema del consumo energético, lo cual ha permitido identificar la localización óptima del MR, y la localización a la que el MR necesita iniciar el reenvío de la información a la red celular. Los resultados obtenidos muestran que pueden conseguirse importantes beneficios energéticos (hasta un 85%) comparado con la transmisión celular tradicional. Este estudio también ha dado lugar a la propuesta de dos técnicas para la selección del MR, las cuales explotan además información contextual proporcionada por la BS celular. Las dos propuestas han demostrado un rendimiento esperanzador considerando el límite inferior de su rendimiento, llegando a reducir los niveles de consumo energético considerablemente con respecto a la transmisión celular tradicional.

Como trabajo futuro, los autores pretenden ampliar el estudio de las técnicas contextuales para seleccionar al MR a distribuciones de nodos no homogéneas y en escenarios bidimensionales. Es también un objetivo de los autores identificar en qué condiciones convendría emplear cada una de las técnicas contextuales de selección del MR.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en parte por el Ministerio de Economía y Competitividad y los fondos FEDER (TEC2011-26109), y la Generalitat Valenciana (ACIF/2010/161 y BEFPI/2012/065).

REFERENCIAS

- [1] L. Long and E. Hossain, "Multihop Cellular Networks: Potential Gains, Research Challenges, and a Resource Allocation Framework", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 45, no. 9, pp. 66-73, Sept. 2007.
- [2] J. Gozalvez and B. Coll-Perales, "Experimental Evaluation of Multi-hop Cellular Networks using Mobile Relays", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 7, pp.122-129, Jul. 2013.
- [3] L. Pelusi, A. Passarella and M. Conti, "Opportunistic Networking: Data Forwarding in Disconnected Mobile Ad-hoc Networks", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 44, pp. 134-141, Nov. 2006.
- [4] A. Radwan and H.S. Hassanein, "Does Multi-hop Communication Extend the Battery Life of Mobile Terminals?", *Proc. IEEE GLOBECOM*, pp. 1-5, San Francisco, Nov. 2006.
- [5] P. Kolios, V. Friderikos and K. Papadaki, "Future Wireless Mobile Networks", *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 6, no. 1, pp. 24-30, Mar. 2011.
- [6] B. Zhao and V. Friderikos, "Optimal Stopping for Energy Efficiency with Delay Constraints in Cognitive Radio Networks", *Proc. IEEE PIMRC*, pp. 820-825, Sydney, Australia, Sept. 2012.
- [7] A. Duda, "Understanding the Performance of 802.11 Networks", *Proc. IEEE PIMRC*, pp. 1-6, Cannes, France, Sept. 2008.
- [8] B. Coll-Perales, J. Gozalvez and J. Sánchez-Soriano, "Empirical Performance Models for P2P and two hops Multi-Hop Cellular Networks with Mobile Relays", *Proc. ACM PM2HW2N*, Nov. 2013.
- [9] R. Schoenen and B.H. Walke, "On PHY and MAC Performance of 3G-LTE in a Multi-Hop Cellular Environment", *Proc. IEEE WiCom*, pp. 926-929, Shanghai, China, Sept. 2007.
- [10] M. Greenberg, "How Much Power Will a Low-Power SDRAM Save you?", White Paper Denali Software, 2009.