

Plataformas Hardware para el Análisis de Redes Cooperativas Multi-hop Cellular Basadas en Retransmisores Móviles

Baldomero Coll-Perales, Juan Ramon Gutierrez, Jonatan Muñoz, Javier Gozalvez*, Marco A. Marhuenda y Alberto Rodriguez
Uwicare, Ubiquitous Wireless Communications Research Laboratory, <http://www.uwicore.umh.es>
Universidad Miguel Hernandez de Elche
Avda. de la Universidad, s/n, 03202 Elche, España
j.gozalvez@umh.es

Resumen — Multi-hop Cellular Networks have recently emerged as a promising technology to overcome the current limitations of cellular systems through the integration of cellular and ad-hoc networking technologies. Several studies have addressed the challenges of Multi-hop Cellular Networks based on Mobile Relays, and demonstrated their performance and potential to improve the user-perceived Quality of Service. However, most of these studies are based on analytical and simulation techniques, and there is yet the need for field tests that confirm the performance of this emerging technology. In this context, the m-Hop project was proposed with the aim of developing novel testbeds to investigate Multi-hop Cellular Networks using Mobile Relays through field testing. This paper presents the first field test results that validate the implementations and demonstrate the performance improvements.

I. INTRODUCCIÓN

La futura generación de redes celulares, o redes de cuarta generación (4G), deberá proveer a los usuarios de telefonía móvil de altas tasas de transmisión y de altos niveles de calidad de servicio (*Quality of Service*, QoS) de un modo homogéneo en todo el área de cobertura de la estación base. La creciente demanda de servicios multimedia en las redes celulares con requisitos más exigentes y más variados supone un importante reto tecnológico, que requiere del desarrollo de nuevas arquitecturas capaces de proporcionar altos niveles de QoS al usuario final. Las actuales redes celulares son incapaces de proporcionar estos exigentes requisitos de QoS debido a la gran distancia que debe recorrer la señal desde el terminal móvil (*Mobile Station*, MS) a la estación base (*Base Station*, BS) en determinadas zonas de la celda; unido a la fuerte atenuación que sufre la señal con la distancia. Aunque incrementar la densidad de BSs o aumentar considerablemente la potencia de transmisión podría ayudar a mejorar los niveles de QoS percibidos, también supondría un elevado coste económico y social. Una alternativa diferente ha sido propuesta recientemente con el firme objetivo de incrementar y homogeneizar los actuales niveles de QoS en todo el área de cobertura a través de la integración de las tecnologías celulares y ad-hoc, dando lugar a lo que se conoce como redes celulares de múltiples saltos (*Multi-hop Cellular Networks*, MCN) [1]. Esta novedosa arquitectura celular sustituye el enlace directo de gran distancia entre la BS y el MS por múltiples enlaces de menor distancia usando tanto retransmisores fijos (*MCN-Fixed Relay*, MCN-FR) como retransmisores móviles (*MCN-Mobile Relay*, MCN-MR). Si bien las redes MCN-MR se caracterizan por un menor coste de implementación que las redes MCN-FR, poseen una mayor complejidad de desarrollo debido a la participación de los propios terminales móviles como retransmisores. Sin embargo, explotar las posibilidades de los terminales móviles de una manera descentralizada y distribuida incrementa el potencial y las perspectivas futuras de las redes MCN-MR.

En este contexto, el proyecto *Comunicaciones Inalámbricas Multi-hop en Redes Heterogéneas de Comunicaciones Móviles Beyond 3G* (m-Hop) fue propuesto para investigar el comportamiento de los sistemas MCN basados en retransmisores móviles dentro de las futuras redes de comunicación 4G. En particular, el proyecto estudia tres importantes campos para garantizar la viabilidad y operatividad de los futuros sistemas MCN-MR. En primer lugar, el proyecto analiza la posibilidad de establecer enlaces *multi-hop* bajo distintas condiciones de operación, como varias densidades de nodos, distintas velocidades de desplazamiento y condiciones de propagación, uso de protocolos de comunicación oportunistas, etc. Este estudio no está centrándose únicamente en análisis teóricos y de simulación [2], sino que también están siendo desarrolladas novedosas plataformas hardware que permiten testear el estado de la red *multi-hop* en tiempo real. En segundo lugar, para garantizar la operatividad de la red es necesaria la cooperación de todas las MS, por lo que en el marco del presente proyecto están siendo estudiadas políticas que incentiven la cooperación de los nodos [3]. Los beneficios que las transmisiones *multi-hop* ofrecen al conjunto de nodos de la red celular podrían resultar en un equilibrio cooperativo que eximiese de incentivos adicionales; esta posibilidad está siendo contemplada. Por último, el proyecto m-Hop también investiga la inclusión de los sistemas MCN-MR como una componente más dentro de una red heterogénea de comunicaciones móviles. En concreto, el proyecto desarrolla novedosas políticas de gestión cooperativa de recursos radio (*Common Radio Resource Management*, CRRM) [4] que incorporan la posibilidad de seleccionar transmisiones *multi-hop* en el proceso de decisión de la tecnología de acceso radio óptima en cada momento.

Este artículo presenta las plataformas hardware que están siendo desarrolladas en el marco del proyecto m-Hop para estudiar la viabilidad de las comunicaciones *multi-hop* dentro de las tecnologías celulares. En concreto, este artículo presenta una plataforma ad-hoc 802.11 totalmente configurable que permite el diseño y desarrollo de novedosos algoritmos y protocolos ad-hoc, por ejemplo protocolos *cross-layer* de enrutamiento *multi-hop*, con la posibilidad de utilizar e interactuar entre todas las capas del modelo de referencia OSI; aspecto que no es posible con equipos comerciales que no ofrecen la posibilidad de reconfigurar sus protocolos. Además, se presenta la novedosa plataforma MCN-MR, la cual permite medir y comparar en tiempo real el comportamiento del enlace celular tradicional con el enlace *multi-hop* celular utilizando retransmisores móviles. Estas plataformas permiten caracterizar la probabilidad de establecer comunicaciones *multi-hop* celular utilizando retransmisores móviles, analizando los parámetros medidos mediante pruebas de campo que tienen una mayor influencia en esta probabilidad. La caracterización proporcionada por las plataformas permite un mejor diseño y configuración de los distintos mecanismos ad-hoc *multi-hop*, además de desarrollar políticas CRRM más realistas.

II. PLATAFORMA AD-HOC HARDWARE TOTALMENTE CONFIGURABLE

Las redes MCN-MR incorporan la flexibilidad de las redes ad-hoc a las tecnologías celulares para ofrecer a los usuarios elevados y homogéneos niveles de QoS. Para explotar las características de las redes ad-hoc, y por lo tanto maximizar el rendimiento de las redes MCN-MR, es necesario tener acceso a todos los recursos disponibles y poder interactuar entre ellos. En este contexto, la plataforma ad-hoc hardware presentada en este trabajo utiliza sistemas radio definidos por software (*Software Defined Radio*, SDR), una novedosa estrategia que otorga total flexibilidad en el diseño de funcionalidades ad-hoc.



Figura 1. Nodos usados en la plataforma ad-hoc hardware

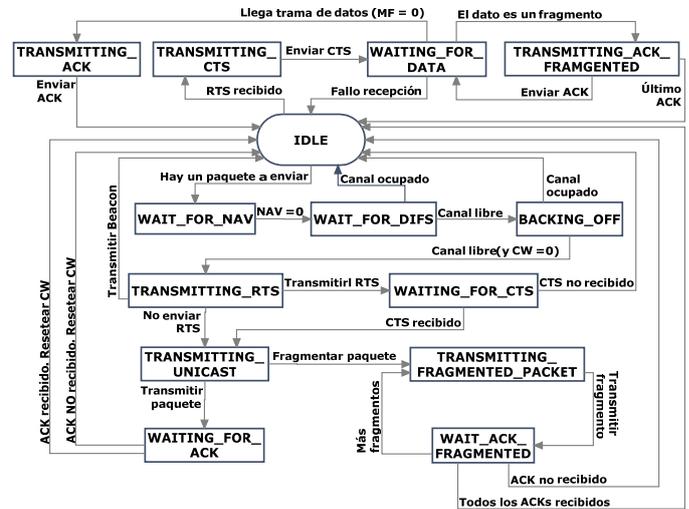


Figura 2. Diagrama de bloques MAC 802.11

A. Sistemas Radio Definidos por Software: GNU Radio y USRP2

Los sistemas SDR suponen una importante revolución en el diseño y desarrollo de funcionalidades ad-hoc, dada su capacidad para crear interfaces radios totalmente dinámicas y configurables. La principal característica de los sistemas SDR es que la forma de onda, tanto transmitida como recibida, está totalmente definida por software. La combinación de las herramientas GNU Radio y USRP2 (Universal Software Radio Peripheral – v2) permite el desarrollo de sistemas SDR. GNU Radio es un conjunto de herramientas software *open source* que proporciona librerías que contienen los bloques de procesamiento de la señal, así como el lenguaje para comunicar dichos bloques. Por otro lado, USRP2 es la componente hardware que se utiliza como interfaz para llevar a cabo la transmisión y recepción de la señal. A través de una FPGA y un transceptor que cubre las bandas del estándar IEEE 802.11 (2.3-2.6 GHz y 4.8-6.1 GHz), la USRP2 procesa la señal formada en GNU Radio y la modula para enviarla a la frecuencia deseada. En la Fig. 3 puede apreciarse el diagrama de bloques de la arquitectura hardware empleada para el diseño de las funcionales ad-hoc *multi-hop* totalmente configurables, mientras que en la Fig. 1 se muestra una imagen real de los nodos utilizados.

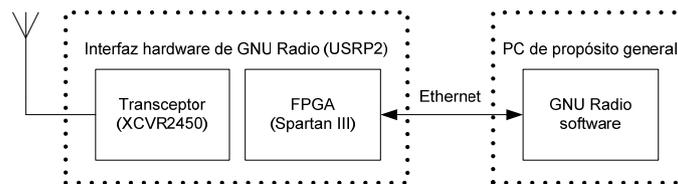


Figura 3. Arquitectura hardware del sistema SDR

B. Protocolo MAC CSMA/CA implementado

Actualmente, no existe ninguna implementación software compatible con los estándares IEEE 802.11 a/g que funcione con USRP2. Este artículo presenta la implementación DCF (*Distributed Coordination Function*), que incorpora los mecanismos de acceso al medio obligatorios según el estándar IEEE 802.11, tales como sensado de canal, fragmentación y retransmisiones, además del algoritmo RTS/CTS (*Request To Send/Clear To Send*) para la reserva virtual del medio. Esta implementación ha sido realizada sobre el transmisor OFDM desarrollado por FTW (*Forschungszentrum Telekommunikation Wien*) en [5], y sus funcionalidades están adaptadas para ser incluidas cuando se complete la implementación del receptor. El diagrama de bloques correspondiente a la máquina de estados que describe el comportamiento de la capa MAC 802.11 se muestra en la Fig. 2.

Ante la llegada de un paquete de datos de capas superiores, y suponiendo un estado inicial de inactividad (*IDLE*), las estaciones esperan los tiempos indicados en la reserva del canal (*WAIT_FOR_NAV*) y el tiempo entre envío de tramas (*WAIT_FOR_DIFS*) para sensar el canal. En caso de que el canal esté libre, las estaciones ejecutan el proceso de *BACKING_OFF* para aleatorizar el acceso al medio entre todas las estaciones que estén dispuestas a transmitir. Si tras esta espera el canal pasa a estar ocupado, la estación regresa al estado *IDLE*; por el contrario, si el canal sigue libre, da comienzo la

transmisión del paquete. En el caso de que haya sido activado el mecanismo de reserva de canal, la estación envía el paquete RTS y queda a la espera de recibir el paquete CTS de la estación destino, cuya recepción provoca el envío del paquete de datos. Según un umbral de fragmentación, el paquete a transmitir se segmenta en varias unidades, o bien se envía toda la información en un único paquete. En cualquiera de los dos casos, la estación pasa al estado *WAITING_FOR_ACK* para esperar el reconocimiento de recepción correcta por parte de la estación destino (*ACK*) y volver al estado *IDLE* a la espera de nuevos eventos. Si por el contrario no se recibe el *ACK*, la estación también regresa al estado *IDLE* para proceder a la retransmisión del paquete hasta un máximo de *Long/Short_Retry* veces.

En cuanto a la recepción de paquetes, la máquina de estados procede acorde a la naturaleza de los mismos. Si la estación recibe un paquete RTS o CTS que no está dirigido a la propia estación, actualiza el temporizador NAV con el valor indicado en el paquete. Si por el contrario el RTS está dirigido a la estación que lo recibe, será necesario responder con el paquete CTS y quedar a la espera de la llegada de los paquetes de datos. Si los paquetes se reciben correctamente, la estación deberá reconocerlo mediante un *ACK* sin hacer contienda por el canal (esperando únicamente *SIFS – Short Interframe Space*). Si el paquete de datos está fragmentado, debe llevarse a cabo además las tareas de reensamblado de los fragmentos.

C. Pruebas de validación

El uso de la tecnología SDR para implementar algoritmos ad-hoc en redes 802.11 proporciona una gran flexibilidad comparable a la que puede obtenerse con estudios realizados mediante simulación, con la ventaja de realizar transmisiones reales y la consiguiente fidelidad de los resultados obtenidos. No obstante, un claro objetivo en el diseño debe ser la completa compatibilidad de las implementaciones con tarjetas WiFi comerciales. Para ello, las primeras pruebas realizadas se centraron en asegurar que el conjunto de paquetes formados en la capa MAC (RTS, CTS, beacon, ACK y datos) fuesen correctamente detectados por un sniffer instalado en un PC con la tarjeta comercial Ubiquiti SR71x.

El procesamiento software para los mecanismos MAC y para la formación de la señal a nivel físico (PHY) implica ciertos retardos, que deben estar totalmente caracterizados para optimizar el rendimiento de las implementaciones. La Fig. 4 muestra el ancho de banda de transmisión obtenido con la herramienta iPerf¹ en una tarjeta comercial para las tasas de transmisión del estándar IEEE 802.11a (canal 40 a 5.2 GHz). La figura también recoge el ancho de banda mostrado por la implementación a nivel PHY según la capacidad de muestreo de USRP2. Sin embargo, el procesamiento software llevado a cabo, y caracterizado temporalmente en la Tabla I, impide alcanzar dichas tasas. El retardo introducido por el sensado a nivel MAC para detectar si el canal está ocupado, junto con el retardo en la comunicación entre capas MAC y PHY, provocan un escalado de los valores que marcan la sincronización y el espaciado entre tramas (*t_slot*, *DIFS* y *SIFS*). El escalado depende de la capacidad del procesador en el que corre el software, de ahí la posibilidad de mejora a medida que lo hagan las CPUs.

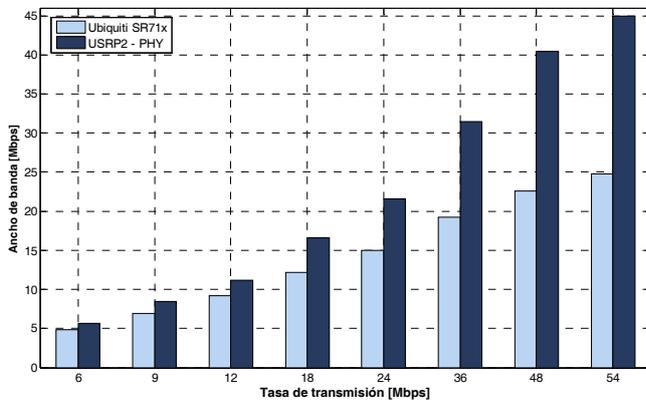


Figura 4. Comparativa de ancho de banda

Tabla I. Caracterización de retardos

Parámetro	Valor
Retardo USRP2/bit [μ seg/bit]	16.665
Retardo PHY/bit [μ seg/bit]	17.607
Retardo socket MAC – PHY [ms]	80.864
Retardo MAC [ms]	282.967
Retardo sensado [ms]	210.664
<i>t_slot</i> (teórico / real) [ms]	0.009 / 72
<i>DIFS</i> (teórico / real) [ms]	0.034 / 272
<i>SIFS</i> (teórico / real) [ms]	0.016 / 128

III. PLATAFORMA HARDWARE MCN-MR

La segunda plataforma propuesta dentro del proyecto m-Hop pretende investigar las mejoras que ofrecen las redes MCN-MR respecto a los sistemas celulares actuales, además de determinar bajo que condiciones se producen estas mejoras.

A. Arquitectura de la plataforma

Para evaluar el comportamiento de la red MCN-MR frente al de la arquitectura celular tradicional, la plataforma MCN-MR propuesta dentro del proyecto m-Hop consta de dos enlaces celulares provistos de las herramientas de monitorización necesarias. Uno de estos enlaces forma parte de la comunicación MCN-MR (L_1 -mH₁-mH₂ en la Fig. 5), mientras que el otro representa el enlace celular convencional de un único salto (L_2) con el que comparar el rendimiento del enlace MCN-MR. Los nodos retransmisores ad-hoc también deben ser capaces de monitorizar su rendimiento y además, en su diseño debe garantizarse la

¹ El ancho de banda del transmisor o cliente en la herramienta iPerf mide la relación entre el número de bits transmitidos y el tiempo necesario para transmitir la información. Las medidas han sido tomadas utilizando datagramas de 1000 bytes y una longitud de datos a transmitir de 4 Gbytes.

escalabilidad de la plataforma. La configuración de la plataforma MCN-MR debe asegurar la flexibilidad para investigar diferentes mecanismos de comunicación, tales como protocolos de enrutamiento *multi-hop*, diferentes estándares 802.11, la influencia de la frecuencia de operación, etc. Además, uno de los nodos retransmisores ad-hoc en el enlace MCN-MR debe actuar como puente entre la tecnología celular y la tecnología ad-hoc, por lo que debe de ser capaz de transmitir en tiempo real el tráfico entre ambas tecnologías sin degradar el rendimiento general de la red.

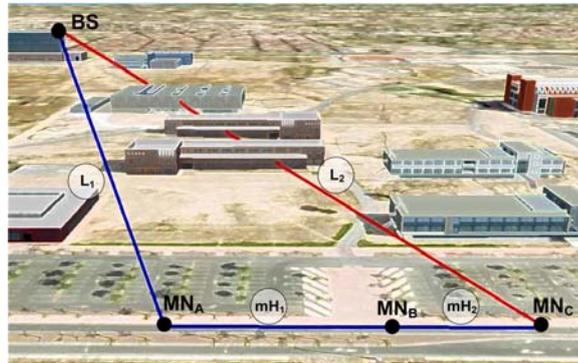


Figura 5. Arquitectura de la plataforma MCN-MR

B. Descripción de los nodos

La plataforma hardware MCN-MR se compone de tres tipos de nodos móviles (*Mobile Node*, MN) con diferentes tecnologías: estación móvil (HSDPA), MN ad-hoc² (802.11a/b/g en modo ad-hoc) y MN híbrido (HSDPA y 802.11a/b/g en modo ad-hoc). La Fig. 6 muestra los nodos móviles totalmente equipados integrados en la plataforma MCN-MR³.

1. Estación móvil celular

La estación móvil celular es un terminal Nokia 6720c que soporta entre otras las tecnologías celulares GSM/EDGE y UMTS/HSDPA. El terminal incorpora la herramienta Nemo Handy: una potente aplicación de monitorización del interfaz radio capaz de obtener avanzadas mediciones de diversas aplicaciones tales como llamadas de voz, video llamadas, transferencia de datos o navegación HTML/WAP. Además de monitorizar el estado de la red en tiempo real, la estación móvil almacena todos los parámetros de la red para su post-procesado, ofreciendo un importante conjunto de indicadores clave de rendimiento (KPIs, *Key Performance Indicators*) tales como throughput, BLER (*Block Error Ratio*) o RSSI (*Received Signal Strength Indication*). Nemo Handy permite forzar el terminal móvil a una determinada tecnología radio, en un canal concreto y a una estación base en particular, garantizando así un escenario estable para las mediciones. A través de un GPS externo conectado por Bluetooth, la aplicación Nemo Handy permite trazar las trayectorias de los nodos y referenciar temporal y espacialmente las medidas de rendimiento.

2. Nodo móvil ad-hoc

Los nodos móviles ad-hoc han sido implementados con portátiles convencionales. Las interfaces WLAN de los portátiles utilizados no son capaces de funcionar en modo ad-hoc en Linux. Por ello, los portátiles han sido equipados con una interfaz inalámbrica adicional y con un receptor GPS conectado por USB. Los receptores GPS son necesarios para sincronizar temporalmente los datos de las pruebas. Además, el uso de un GPS en cada nodo permite ir trazando su trayectoria y georeferenciar todas las medidas radio tomadas. La interfaz inalámbrica añadida se encarga de las transmisiones ad-hoc *multi-hop*, mientras que la interfaz WLAN propia del portátil se encarga de capturar el tráfico transmitido y recibido por la interfaz añadida. La capacidad de capturar el tráfico permite monitorizar el rendimiento del enlace 802.11 ad-hoc.

La interfaz WLAN añadida es una tarjeta de red ExpressCard con chipset Atheros. La elección de esta tarjeta es debida al resultado de la comparación con otras tarjetas del mercado de parámetros como los estándares IEEE 802.11 soportados, la tasa de transmisión o el rango de emisión en exteriores, entre otros. Los nodos ad-hoc cuentan con el sistema operativo (SO) de Linux Ubuntu 9.10 que incluye el núcleo 2.6.31. Este SO permite configurar diversos parámetros de la capa física en las interfaces inalámbricas. Además Linux posee potentes herramientas para este fin, tales como el controlador Ath9K. El controlador Ath9k, es software libre y de código abierto desarrollado inicialmente por Atheros. Este controlador expande las características técnicas del antiguo controlador de Linux Madwifi a todos los chipsets Atheros que soportan 802.11n⁴.

Los nodos móviles ad-hoc también incluyen software de monitorización para capturar el tráfico 802.11. En concreto, los nodos ad-hoc usan las herramientas Kismet y Wireshark. Kismet es un *sniffer* y detector de redes inalámbricas a nivel MAC capaz de georeferenciar en tiempo y espacio los paquetes capturados usando la información del GPS. Por otro lado, Wireshark es un analizador de paquetes de red además de una potente herramienta de filtrado que permite al usuario organizar los paquetes capturados, facilitando así el post-procesado que determina los parámetros de QoS más relevantes de los enlaces ad-hoc *multi-hop*.

² La plataforma configurable descrita en la sección II podrá utilizarse como MN ad-hoc una vez superadas las limitaciones de procesamiento software mostradas.

³ La plataforma MCN-MR actualmente incluye los nodos de la Fig. 6, pero en el proyecto se trabaja en integrar más nodos de diversos tipos, como por ejemplo mini PCs o PDAS.

⁴ Aunque la plataforma hardware está preparada para soportar el estándar 802.11n, el controlador Ath9k aún no ofrece soporte para el estándar 802.11n en modo ad-hoc. Como consecuencia, los nodos ad-hoc usan actualmente los estándares 802.11a/b/g.

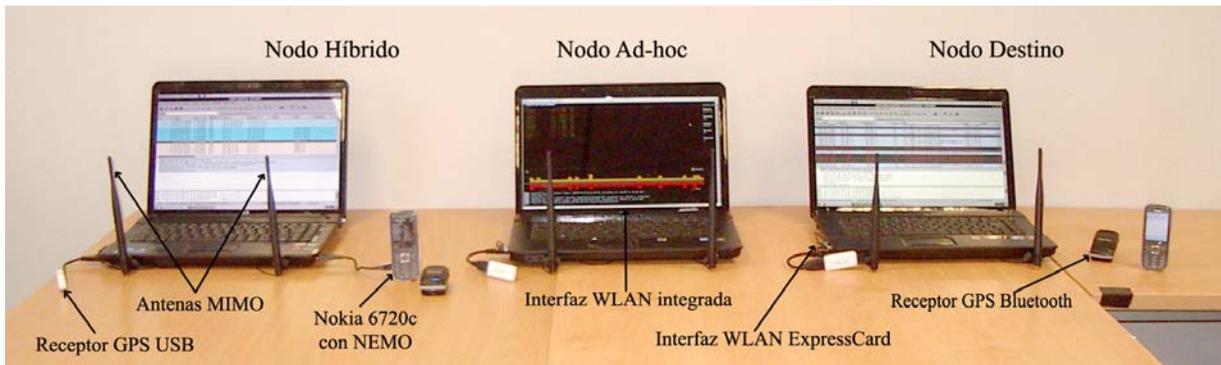


Figura 6. Nodos usados en la plataforma MCN-MR.

3. *Nodo móvil híbrido*

Los nodos híbridos son los encargados de actuar como puentes entre las redes celulares y las redes 802.11 ad-hoc *multi-hop*. Con el fin de incorporar la tecnología 802.11 con mayor rendimiento, p.ej., 802.11n, el nodo híbrido se implementa en un portátil estándar. El nodo usa un terminal móvil Nokia 6720c como modem para proporcionar un enlace celular HSDPA, y utiliza la interfaz WLAN adicional del nodo ad-hoc para posibilitar la conectividad 802.11 ad-hoc *multi-hop*. El reenvío de datos en tiempo real del enlace celular al enlace 802.11 ad-hoc se habilita modificando las tablas de ruta de los portátiles de la red ad-hoc establecida. Finalmente, el nodo híbrido incluye tanto el software de monitorización como los GPSs descritos anteriormente.

C. *Pruebas de campo y resultados obtenidos*

Los ensayos de campo han sido realizados en el campus de la Universidad Miguel Hernández de Elche. La Fig. 5 muestra la ubicación de la BS y la posición de los nodos. La campaña de medidas descrita en este apartado pretende demostrar el mayor rendimiento y la mejora en la QoS que puede conseguirse al utilizar enlaces MCN-MR operando en condiciones LOS cuando el enlace celular tradicional opera bajo condiciones NLOS. Para tal fin, se descarga un archivo a través de la BS al nodo destino MN_C , situado a una distancia de 760 metros. La descarga se realiza de manera simultánea a través del enlace celular de un único salto (L_2) y a través del enlace MCN-MR (L_1 - mH_1 - mH_2) usando los nodos MN_A y MN_B como retransmisores móviles. MN_A está situado a una distancia de 740 metros de la BS, mientras que MN_B y MN_C están posicionados a 60 y 100 metros respectivamente de MN_A .

La tecnología radio usada en las pruebas para los enlaces celulares (L_1 y L_2) ha sido HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*). Los nodos móviles se comunican entre ellos usando el estándar IEEE 802.11g a 2.4GHz, el cual provee una tasa máxima teórica de 54Mbps/s. Sin embargo, el controlador Ath9k fija la tasa de transmisión mediante un algoritmo de control adaptativo. Además, la potencia de transmisión de los nodos móviles para las comunicaciones 802.11 ad-hoc ha sido fijada a 27dBm (potencia máxima permitida a 2.4GHz por la tarjeta externa). El enlace MCN-MR necesita que el nodo móvil híbrido (MN_A) transforme los bloques de transporte recibidos a través del enlace L_1 en unidades de datos de paquetes 802.11 (*Packet Data Unit*, MAC PDU). MN_A almacena en un buffer varios bloques de transporte HSDPA hasta completar un MAC PDU para después transmitirlo a MN_B a través de un enlace 802.11 ad-hoc (mH_1). MN_B actúa como retransmisor y reenvía el paquete hacia el nodo destino MN_C a través de otro enlace 802.11 ad-hoc (mH_2). El paso a través de los enlaces mH_1 y mH_2 se fuerza modificando la tabla de ruta de cada uno de los portátiles.

Las Figuras 7 y 8 muestran el throughput y el RSSI medido durante la descarga del fichero en el enlace celular directo (L_2). Aunque el estándar HSDPA permite un máximo de 15 códigos de canalización simultáneos y el uso de modulación 16QAM, las condiciones NLOS del enlace L_2 se traducen en el uso de una modulación más robusta (QPSK) y un número de códigos menor (2.5 de media), lo cual se traduce en una tasa de transmisión baja. Los intervalos en los que el nivel de throughput es igual a cero, indican una disminución repentina del RSSI que provoca cortes en la comunicación. Aunque el RSSI se restablece tras un breve instante de tiempo, MN_C necesita recuperar el acceso al sistema y obtener los recursos radio necesarios; lo cual explica las pausas en la descarga apreciadas en la Fig. 7. Las malas condiciones del enlace L_2 también pueden apreciarse en los valores experimentados de BLER mostrados en la Fig. 9.

La Fig. 10a pone de manifiesto las mejoras en el rendimiento al experimentar condiciones LOS en el enlace celular (L_1). En este caso, el promedio de códigos de canalización es de 5, y además L_1 utiliza una modulación de mayor nivel que el enlace L_2 . Estas mejoras se traducen en un mayor throughput experimentado en el enlace L_1 , que permite la descarga del fichero en sólo 90s, comparado con los 500s necesarios por el enlace L_2 . Los cortes en la comunicación también desaparecen cuando el enlace opera bajo condiciones LOS, por los mayores y más estables valores de RSSI (Fig. 11a). De igual modo, las mejores condiciones de propagación también se traducen en la reducción del BLER que muestra la Fig. 12a.

El throughput medido en cada uno de los enlaces 802.11 ad-hoc se muestra en las Figuras 11b y 11c. El tráfico a través del enlace MCN-MR se reenvía en tiempo real, por lo que el throughput de los enlaces mH_1 y mH_2 son muy similares a los del enlace L_1 . Las mayores tasas de transmisión teóricas de los enlaces 802.11 permiten afirmar que el enlace L_1 actúa como cuello de botella del enlace completo MCN-MR. El funcionamiento más estable del enlace ad-hoc mH_2 frente a mH_1 es debido a la diferencia de la longitud de ambos enlaces, lo cual provoca variaciones en los niveles de señal medidos (Figuras 11b y 11c) y en la calidad de los enlaces (Figuras 12b y 12c). Finalmente, es posible afirmar que el throughput medio del enlace completo MCN-MR (816Kbits/s) mejora sustancialmente al del enlace celular tradicional (229Kbits/s) al evitar las condiciones de NLOS.

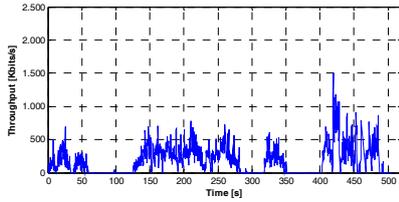


Figura 7. Throughput del enlace HSDPA (L_2)

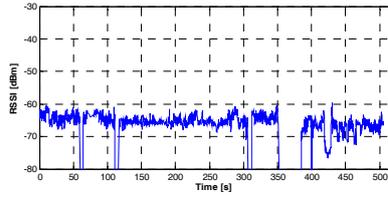


Figura 8. RSSI del enlace HSDPA (L_2)

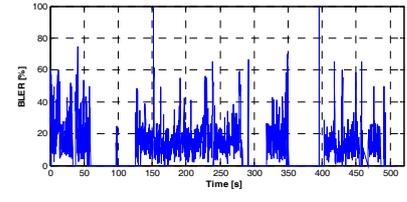


Figura 9. BLER del enlace HSDPA (L_2)

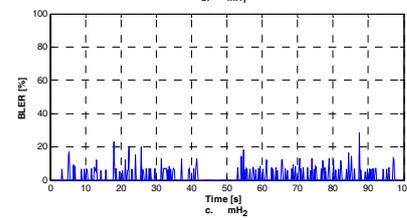
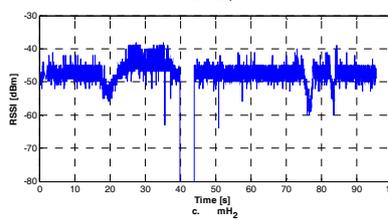
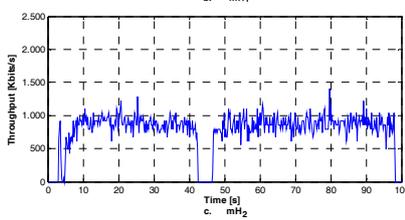
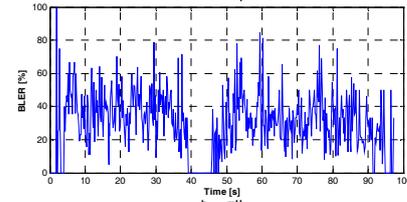
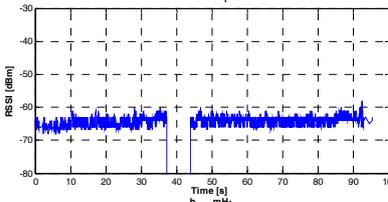
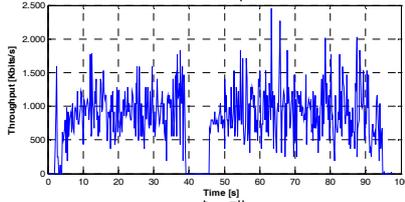
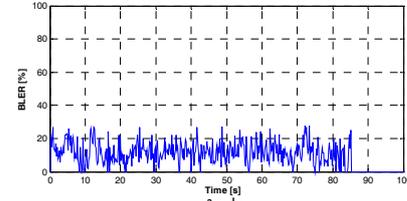
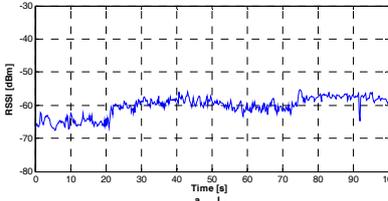
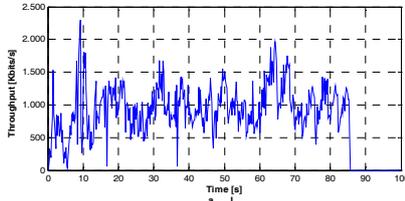


Figura 10. Throughput del enlace MCN-MR

Figura 11. RSSI del enlace MCN-MR

Figura 12. BLER del enlace MCN-MR

IV. CONCLUSIONES

Este artículo ha presentado dos novedosas plataformas hardware diseñadas para desarrollar estaciones móviles totalmente configurables y para investigar el rendimiento de las redes MCN-MR. Estas plataformas permiten analizar bajo qué condiciones la tecnología MCN-MR supone una ventaja frente a los sistemas tradicionales celulares. El artículo presenta además los primeros resultados obtenidos para validar el funcionamiento de la plataforma hardware totalmente configurable, y las mediciones realizadas con la plataforma MCN-MR que demuestran las importantes mejoras en la QoS percibida por el usuario que pueden conseguirse con esta tecnología emergente.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y los fondos FEDER bajo el proyecto TEC2008-06728 (*Comunicaciones Inalámbricas Multi-hop en Redes Heterogéneas de Comunicaciones móviles Beyond 3, m-Hop*) y la Generalitat Valenciana con referencias ACOMP/2010/111 y ACIF/2010/161.

REFERENCIAS

- [1] D. Cavalcanti, D. Agrawal, C. Cordeiro, B. Xie and A. Kumar, "Issues in integrating cellular Networks, WLANs, and MANETs: a futuristic heterogeneous wireless network", *IEEE Wireless Communications Magazine*, vol.12, no.3, pp. 30- 41, 2005.
- [2] B. Coll and J. Gozalvez, "Energy Efficient Routing Protocols for Multi-hop Cellular Networks", in *Proceedings of the IEEE 20th Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Symposium (PIMRC)*, pp. 1457-1461, 2009.
- [3] A. Rodriguez and J. Gozalvez, "Improving Selfishness Detection in Reputation Protocols for Cooperative Mobile Ad-hoc Networks", in *Proceedings of the IEEE 21st Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Symposium (PIMRC)*, pp. 1-6, 2010.
- [4] M. Lucas-Estañ and J. Gozalvez, "Real-Time Computational Performance of advanced JRRM Policies in B3G Heterogeneous Wireless Systems", in *Proceedings of the 16th European Wireless Conference*, pp. 1-6, 2010.
- [5] P. Fuxjäger et al., "IEEE 802.11p Transmission Using GNURadio", in *Proceedings of the IEEE 6th Karlsruhe Workshop on Software Radios (WSR)*, pp. 1-4, 2010.