

Plataforma Experimental y Estudio de la Calidad de Servicio en Redes Multi-Hop Celulares con Retransmisores Móviles

Baldomero Coll, Jónatan Muñoz y Javier Gozávez

bcoll@umh.es, jmunoz@umh.es, jgozalvez@umh.es

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

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

Abstract— 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, this paper introduces a novel testbed to investigate Multi-hop Cellular Networks using Mobile Relays through field testing. In addition, this paper also presents the first field test results that demonstrate the performance improvements that can be achieved with Multi-Hop Cellular Networks over traditional cellular systems.

I. INTRODUCCIÓN

La futura generación de redes celulares (*Beyond 3G o 4G*) deberá proveer a los usuarios de telefonía móvil de calidades de servicio (QoS, *Quality of Service*) altas y homogéneas en todo el área de cobertura de la celda. Las actuales tecnologías celulares son incapaces de satisfacer la homogeneidad en la QoS principalmente por la fuerte atenuación que sufre la señal con la distancia y por las condiciones tan variables de propagación causadas por la presencia de obstáculos. Aunque incrementar la densidad de estaciones base puede ayudar a mejorar los niveles de QoS percibidos, también supone un elevado coste social y económico. Una alternativa diferente para incrementar los niveles de QoS ha sido propuesta recientemente a través de la integración de las tecnologías celulares y ad-hoc en lo que se conoce como redes celulares de múltiples saltos (MCNs, *Multi-hop Cellular Networks*) [1]. Las redes MCN son capaces de incrementar la tasa de transmisión y de proveer de niveles de calidad más homogéneos al sustituir un enlace directo entre el terminal móvil (MS, *Mobile Station*) y la estación base (BS, *Base Station*) por un enlace *multi-hop* usando retransmisores fijos (MCN-FR, *MCN-Fixed Relay*) o retransmisores móviles (MCN-MR, *MCN-Mobile Relay*). Si bien las redes MCN-MR se caracterizan por un menor coste de implementación, poseen mayor complejidad de desarrollo debido a la participación de retransmisores móviles. 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.

Las ventajas de la utilización de enlaces radio compuestos de múltiples saltos desde el origen al destino reduce la distancia de comunicación y por tanto las pérdidas de la señal en cada salto, ofreciendo así la posibilidad de incrementar la tasa de transmisión del enlace completo.

Además, el uso de retransmisores mejora la calidad de la señal al reemplazar enlaces sin visión directa (NLOS, *Non Line-of-Sight*) por enlaces *multi-hop* con visión directa (LOS, *Line-of-Sight*). Estudios previos han demostrado las múltiples ventajas que las redes MCN introducen en términos de mejora de la capacidad, extensión del radio de cobertura de la celda o eficiencia energética [2]. Sin embargo, estos estudios se han centrado exclusivamente en investigaciones teóricas o de simulación, y todavía existe la necesidad de validar el potencial de las redes celulares *multi-hop* mediante plataformas hardware y pruebas de campo.

Existe un interés creciente en la comunidad investigadora por desarrollar y diseñar plataformas hardware con el objetivo de investigar el potencial y el rendimiento de los sistemas de comunicación *multi-hop*. La mayor parte de la actividad investigadora se centra en el estudio de redes 802.11 y en el desarrollo de mecanismos de cooperación en comunicaciones ad-hoc *multi-hop*. Una demostración práctica del potencial de este tipo de redes se muestra en [3], donde los autores proponen un mecanismo *cross-layer* que permite seleccionar una estación retransmisora para reenviar paquetes a nivel MAC; consiguiendo de este modo incrementar notablemente el rendimiento de las redes tradicionales 802.11. No obstante, la actividad existente en la literatura sobre el desarrollo de plataformas híbridas entre redes ad-hoc y redes celulares es escasa.

Por otro lado, cabe resaltar el desarrollo de la plataforma hardware LTE-Advanced [4]. Esta plataforma tiene una gran relevancia puesto que LTE-Advanced será el primer estándar celular que considerará una arquitectura MCN. En este contexto, el trabajo expuesto en [4] presenta la implementación de un prototipo que demuestra el impacto en el incremento de cobertura y capacidad sobre los sistemas celulares que poseen las técnicas MCN-FR. La plataforma LTE-Advanced presentada en [4] corrobora los beneficios de la tecnología MCN-FR; aunque también deja de manifiesto el costes de despliegue de infraestructura y la necesidad de posicionar estratégicamente los nodos fijos retransmisores en condiciones LOS a la estación base a fin de obtener la máxima calidad de servicio.

En este contexto y a conocimiento de los autores, este trabajo introduce una novedosa plataforma hardware para investigar las mejoras que ofrecen las redes MCN-MR respecto a los sistemas celulares actuales y bajo qué condiciones se producen estas mejoras. Además en este artículo también se presentan los primeros resultados de campo que confirman algunas de las ventajas de las redes MCN-MR.

II. PLATAFORMA HARDWARE MCN-MR

A. Arquitectura de la plataforma

Para el diseño e implementación de una plataforma destinada al estudio de comunicaciones MCN-MR tienen que tenerse en cuenta ciertos criterios a fin de garantizar su máxima funcionalidad y flexibilidad. La plataforma precisa de dos enlaces celulares con las herramientas de monitorización necesarias para evaluar su rendimiento. Uno de estos enlaces forma parte de la comunicación MCN-MR, mientras que el otro representa el enlace celular convencional de un único salto 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 escalabilidad de la plataforma. La configuración de la plataforma MCN-MR debe también asegurar la flexibilidad para investigar diferentes mecanismos de comunicación, tales como protocolos de enrutamiento *multi-hop*, estándares 802.11, frecuencias, 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. En la Fig.1 puede apreciarse un ejemplo de comunicación MCN-MR a través de los enlaces L_1 - mH_1 - mH_2 , frente al enlace celular tradicional llevado a cabo a través del enlace L_2 .

B. Nodos móviles

La plataforma hardware se compone de tres tipos de nodos móviles (MN, *Mobile Node*) con diferentes tecnologías: MN ad-hoc (802.11a/b/g en modo ad-hoc), estación móvil (HSDPA), y MN híbrido (HSDPA y 802.11a/b/g en modo ad-hoc). La Fig. 2 muestra los nodos móviles totalmente equipados integrados en la plataforma MCN-MR².

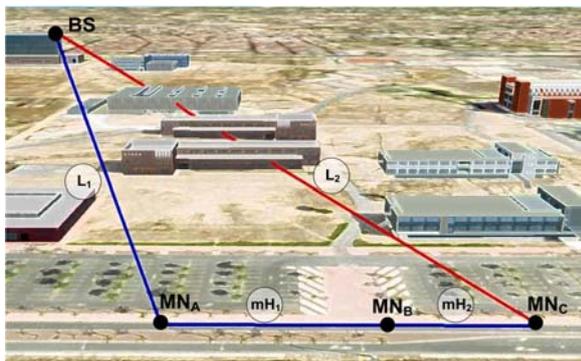


Fig. 1. Arquitectura de la Plataforma MCN-MR

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 también incorpora la herramienta Nemo Handy: una potente aplicación de

monitorización del interfaz radio capaz de obtener avanzadas mediciones sobre llamadas de voz y video llamadas, transferencia de datos o navegación HTML/WAP. Nemo Handy, además de monitorizar el estado de la red en tiempo real también ofrece la posibilidad de almacenar todos los parámetros de la red para su post-procesado. Este post-procesado se realiza usando la herramienta Nemo Outdoor, la cual ofrece 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*). Otra característica importante de Nemo Handy es la posibilidad de forzar el terminal móvil a una determinada tecnología radio, en un canal concreto y a una estación base en particular. Estas características son importantes para garantizar un escenario estable para las pruebas. La aplicación Nemo Handy ofrece sincronización espacial y temporal mediante un GPS externo conectado vía Bluetooth al terminal móvil. Los datos del GPS son utilizados para trazar las trayectorias de los nodos y georeferenciar todas 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. Como resultado, 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. Como se muestra en la Fig. 2, las antenas de la tarjeta ExpressCard se sitúan a la misma altura de la interfaz WLAN del portátil. Ello favorece a que la interfaz propia del portátil capture el tráfico del enlace ad-hoc de forma correcta.

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 (FOSS, *Free and OpenSource Software*) desarrollado inicialmente por Atheros. Este controlador expande las características técnicas del antiguo controlador de Linux *Madwifi* a todos los chipsets Atheros que soportan el estándar 802.11n³.

² La plataforma MCN-MR actualmente incluye los nodos de la Fig. 2 pero los autores trabajan en integrar más nodos de diversos tipos como por ejemplo mini PCs o PDAS.

³ Aunque la plataforma hardware está preparada para soportar el estándar 802.11n, a la hora de escribir este artículo, el controlador Ath9k todavía no ofrecía soporte para el estándar 802.11n en modo ad-hoc. Como consecuencia, los nodos ad-hoc usan los estándares 802.11a/b/g.

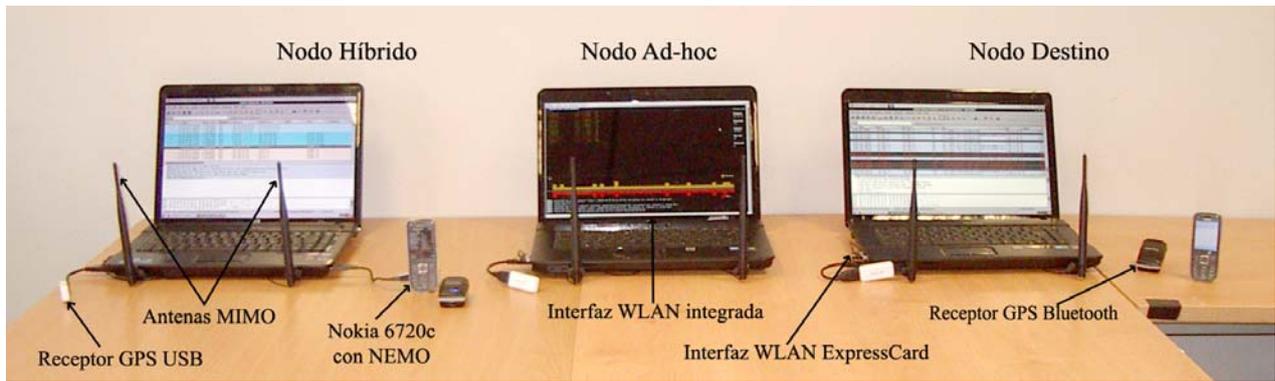


Fig. 2. Nodos usados en la Plataforma Hardware MCN-MR

El controlador Ath9k está incluido en el núcleo 2.6.27 o posteriores y se pueden actualizar instalando el paquete *compat-wireless* (la versión utilizada en este artículo es 2.6.32.11) disponible en [5]. Además del controlador es necesario utilizar el paquete *wireless tools* para modificar los parámetros de la capa física de las interfaces WLAN. Haciendo uso de este paquete, el usuario puede cambiar el canal o la potencia de transmisión entre otros parámetros. El paquete *wireless tools* también se utiliza para configurar cada una de las interfaces WLAN adicionales en modo ad-hoc y las interfaces propias de los portátiles en modo monitor para capturar el intercambio de datos entre las interfaces inalámbricas ExpressCard.

Los nodos móviles ad-hoc también incluyen software de monitorización para capturar el tráfico 802.11⁴. En concreto, los nodos ad-hoc hacen uso de las herramientas Kismet y Wireshark. Kismet es un *sniffer* y detector de redes inalámbricas a nivel MAC, mientras que Wireshark es un analizador de paquetes de red además de una potente herramienta de filtrado. La plataforma MCN-MR hace uso de ambas herramientas de software porque poseen distintas características. Kismet es capaz de georeferenciar en tiempo y espacio los paquetes capturados usando la información del GPS. Sin embargo no proporciona una interfaz gráfica como hace Wireshark, que permite al usuario organizar y filtrar los paquetes capturados. Las posibilidades que ofrece Wireshark son necesarias para el post-procesado del tráfico de las redes MCN-MR. De este modo, el software Kismet es utilizado para capturar el tráfico, georeferenciarlo en tiempo y espacio y almacenarlo en un archivo que será procesado en Wireshark, donde se filtran los paquetes capturados y se guardaran en un archivo de texto que más tarde se procesará para analizar la QoS entregada por las redes MCN-MR.

3. Nodo móvil híbrido

Los nodos híbridos son aquellos 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 el software de monitorización descrito en la estación móvil celular y en el nodo móvil ad-hoc, además de los receptores GPS.

III. PRUEBAS DE CAMPO

Como ampliación a la presentación de la plataforma hardware MCN-MR, este artículo también expone las primeras pruebas de campo que demuestran el rendimiento y potencial de esta tecnología emergente.

A. Escenario de las pruebas.

Los ensayos de campo se han realizado en el campus de la universidad Miguel Hernández de Elche. La Fig. 1 muestra la ubicación de la BS y la posición de los nodos. Con la campaña de medidas de campo descrita en este apartado se pretende demostrar el mayor rendimiento y la mejora en la QoS que introducen las redes MCN-MR cuando el enlace celular tradicional opera bajo condiciones NLOS. Con este objetivo, se compara el rendimiento de un enlace celular tradicional bajo condiciones NLOS con la BS, con el obtenido por un enlace MCN-MR funcionando en condiciones LOS a través de varios saltos. 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 . Los enlaces L_1 , mH_1 y mH_2 funcionan bajo condiciones LOS.

La tecnología radio usada en las pruebas para los enlaces celulares (L_1 y L_2) ha sido HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*). Con el software Nemo Handy se fuerza la conexión del enlace celular con una única BS, así se evita la re-selección automática de celdas adyacentes con mejor señal y permite un entorno estable para la realización de las pruebas. Además, con el fin de conseguir unas condiciones reales de funcionamiento, la BS no se bloquea y otros usuarios pueden hacer uso de ella.

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 [5]. Además, la potencia de transmisión de los nodos móviles para las comunicaciones 802.11 ad-hoc ha sido fijada a 27dBm.

⁴ El software de monitorización añade una cabecera a los paquetes capturados con información física tan útil como el RSSI, el canal, la tasa de transmisión o el tamaño del paquete.

Las pruebas comienzan al lanzar un script desde el nodo MN_C que descarga un fichero de gran tamaño de un servidor HTTP gestionado por el laboratorio Uwicore; el cual no tiene limitado el número de usuarios ni la velocidad de descarga. Para garantizar la misma carga de tráfico en los dos enlaces, la descarga se lanza de forma simultánea por ambos enlaces (L_2 y L_1 - mH_1 - mH_2). 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 (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). Los enlaces mH_1 y mH_2 se fuerzan modificando la tabla de ruta de cada uno de los portátiles.

B. Resultados de las pruebas de campo.

Los resultados mostrados en este apartado ponen de manifiesto la capacidad de las redes MCN-MR para mejorar la QoS percibida por los usuarios evitando condiciones de propagación NLOS.

La Fig. 3 muestra 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). Los intervalos en los que los nivel de throughput son igual a cero, indican una disminución repentina del RSSI (Fig. 3b) 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. 3a.

La Fig. 4a pone de manifiesto las mejoras en el rendimiento al experimentar condiciones LOS en el enlace celular (L_1). El promedio de códigos de canalización en este caso es de 5, 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 una 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. 4b).

El throughput medido en cada uno de los enlaces 802.11 ad-hoc se muestra en las Figuras 4c y 4e. El tráfico a través del enlace MCN-MR se reenvía en tiempo real, a causa de esto el throughput del enlace 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 nivel de señal medidos (Figuras 4d y 4f). 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.

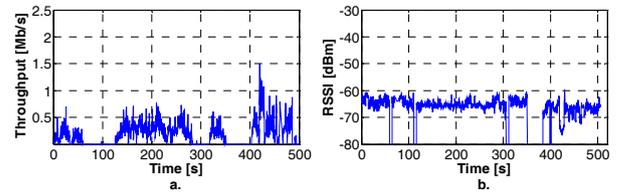


Fig. 3. Throughput y RSSI medidos para el enlace celular HSDPA (L_2)

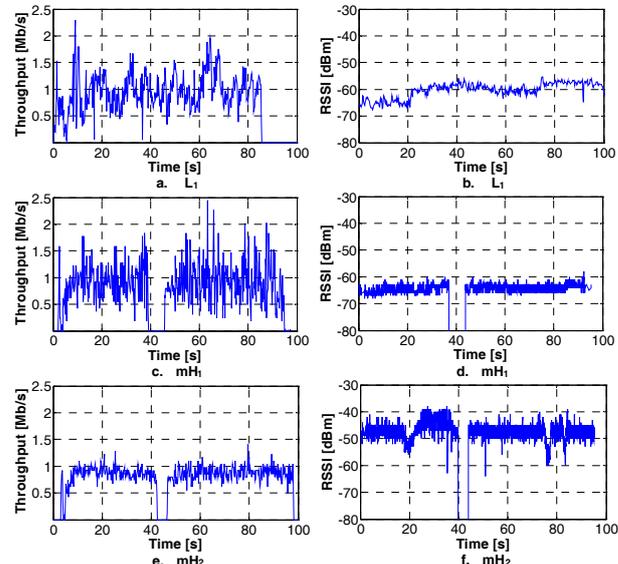


Fig. 4. Throughput y RSSI medidos para el enlace MCN-MR (L_1 - mH_1 - mH_2)

IV. CONCLUSIONES

Este artículo ha presentado una plataforma real para estudiar las prestaciones de las redes MCN-MR y analizar bajo qué condiciones se obtienen mejoras frente a los enlaces celulares tradicionales. Asimismo, el artículo expone los resultados de las primeras pruebas de campo que validan el potencial de las redes MCN-MR evitando situaciones NLOS. Los autores trabajan actualmente en una extensa campaña de pruebas de campo que investigará el rendimiento de las redes MCN-MR bajo diversos escenarios.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y los fondos FEDER bajo los proyectos TEC2008-06728 y TSI-02400-2008-113, y la Comunidad Valenciana con referencia ACOMP/2010/111 y ACIF/2010/161. Los autores también agradecen el apoyo de Orange España.

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", in *IEEE Wireless Communications Magazine*, vol. 12, no. 3, pp. 30 - 41, 2005.
- [2] R. Pabst, et al., "Relay-based deployment concepts for wireless and mobile broadband radio", in *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 9, pp. 80 - 89, 2004.
- [3] T. Korakis, M. Knox, E. Erkip and S. Panwar, "Cooperative Network Implementation Using Open-Source Platforms", in *IEEE Communication Magazine*, vol. 47, no. 2, pp. 134 - 141, 2009.
- [4] T. Wirth, V. Venkatkumar, T. Haustein, E. Schulz, and R. Halfmann, "LTE-Advanced Relaying for Outdoor Range Extension", in *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2009-Fall)*, pp. 1 - 4, 2009, USA.
- [5] Linux Wireless - ath9k driver. Sitio web oficial: <http://wireless.kernel.org/en/users/Drivers/ath9k>.