

Comunicaciones D2D Oportunistas: Evaluación Experimental del rendimiento en términos de Energía, Capacidad y QoS

Alejandro Moraleda-Soler⁽¹⁾, Baldomero Coll-Perales⁽¹⁾, Javier Gozalvez⁽¹⁾ y Óscar Lázaro⁽²⁾

amoraleda@umh.es, bcoll@umh.es, j.gozalvez@umh.es, olazaro@innovalia.org

⁽¹⁾UWICORE, Ubiquitous Wireless Communications Research Laboratory, www.uwicore.umh.es
Universidad Miguel Hernández de Elche. Avda. de la Universidad, s/n, 03202, Elche (España)

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

Abstract— Device-to-Device (D2D) communications can efficiently support the growth in mobile data traffic by offloading part of the traffic from the cellular infrastructure. The performance and operation of D2D communications strongly depend on the communication conditions between mobile devices which can be particularly challenging as a result of the antenna heights, the presence of obstacles, and the mobility of devices. Opportunistic transmission schemes can help to address these challenges, and to improve the reliability and efficiency of D2D communications by scheduling transmissions based on the link quality conditions. This paper experimentally demonstrates the energy, the capacity and the Quality of Service (QoS) benefits that link-aware opportunistic schemes can provide to D2D communications. That is done through an experimental platform that employs commercial hardware and modifies Linux Kernel to implement cross-layer opportunistic transmission schemes.

I. INTRODUCCIÓN

Se ha propuesto el uso de comunicaciones D2D para cursar parte del tráfico de datos de las redes celulares y así mejorar la capacidad y el consumo energético del sistema [1]. El 3GPP está considerando el uso de las tecnologías *Long Term Evolution (LTE-Direct)* e IEEE 802.11 (*WiFi Direct*) con el fin de realizar las comunicaciones D2D [2]. Para lograr los beneficios esperados del uso de las comunicaciones D2D es necesario abordar los desafíos técnicos que puedan resultar de las difíciles condiciones de propagación entre dispositivos móviles. De hecho, las comunicaciones D2D pueden ser altamente ineficientes en condiciones de inestabilidad y baja calidad del enlace [3]. Este tipo de ineficiencias se pueden abordar con el uso de *Link Adaptation* y *Power Control*. Sin embargo, estas técnicas pueden suponer el uso de modos de transmisión con alta potencia y bajos *throughputs* [4]. Una alternativa a este tipo de técnicas es el uso de esquemas de transmisión oportunistas que pausen la comunicación D2D bajo condiciones de baja fiabilidad y eficiencia del enlace. Las políticas oportunistas pueden introducir ciertos retardos en la transmisión. No obstante, tal y como presenta Cisco en [5], varios de los servicios y aplicaciones que están impulsando el crecimiento del tráfico de datos en las redes celulares se pueden calificar de tolerantes al retraso (ej. Actualizaciones en redes sociales, emails o servicios en la nube).

Varios trabajos previos ya han demostrado las ventajas del uso de comunicaciones D2D oportunistas. En [6], los autores demuestran los beneficios energéticos obtenidos al usar esquemas oportunistas sirviéndose de una estrategia de parada óptima en la planificación de la transmisión D2D; esta estrategia usa la información del estado del canal y el

conocimiento del retardo máximo tolerado. En [7] y [8] se presentan los beneficios en términos de *throughput* y probabilidad de bloqueo del uso de comunicaciones D2D oportunistas y se evalúa el impacto de utilizar un buffer de tamaño finito para la pausa. Estos estudios resaltan los beneficios en términos de eficiencia, rendimiento y fiabilidad de las comunicaciones D2D oportunistas mediante estudios analíticos y numéricos. Por tanto, es necesario demostrar experimentalmente dichos beneficios. En este contexto, este artículo presenta, según el conocimiento de los autores, la primera implementación y evaluación en dispositivos de hardware comercial de un esquema de gestión oportunista de la transmisión D2D basado en la calidad del enlace. Debido a la no disponibilidad de soluciones *LTE-Direct*, el estudio se ha llevado a cabo sobre equipos que operan con el protocolo IEEE 802.11. Sin embargo, los beneficios esperados del uso de comunicaciones oportunistas podrían aplicarse a cualquier estándar. Este trabajo también demuestra experimentalmente que esquemas sencillos de transmisión D2D oportunista pueden ofrecer grandes beneficios en términos de energía, capacidad y QoS.

II. COMUNICACIONES OPORTUNISTAS BASADAS EN LA CALIDAD DEL ENLACE

El objetivo de este trabajo es evidenciar los beneficios de utilizar comunicaciones D2D oportunistas. Para ello, se ha implementado un esquema de transmisión oportunista para determinar cuándo se ha de pausar/reiniciar la comunicación D2D entre dos dispositivos móviles con el fin de mejorar el rendimiento y la fiabilidad y reducir el consumo energético y la ocupación del canal. Los dos dispositivos móviles utilizan la tecnología IEEE 802.11 e intercambian paquetes de datos, gestión y control que permiten administrar la conectividad de la red y monitorizar el rendimiento del enlace D2D. La política oportunista implementada únicamente se aplica a los paquetes de datos, manteniendo el enlace D2D activo mediante el intercambio de paquetes de control y gestión.

El esquema implementado se basa en el *Received Signal Strength Indicator (RSSI)* para estimar la calidad del enlace y decidir cuándo pausar/reiniciar la transmisión. Se ha optado por utilizar esta medida ya que se puede obtener experimentalmente con un coste computacional reducido en la mayoría de dispositivos inalámbricos. La Fig. 1 presenta el diagrama de bloques del esquema oportunista basado en la calidad del enlace implementado en ambos dispositivos de comunicación a través de un enlace D2D. La implementación

de este esquema se ha realizado en la Capa de Enlace de Datos para no interferir en los procesos de la capa de usuario ni en ningún otro proceso del estándar dependiente del tiempo, como pueden ser los mecanismos de contención de acceso al canal radio. En el proceso de transmisión (Fig. 1.a), el módulo de decisión evalúa si los paquetes de datos recibidos desde las capas superiores pasan directamente a la capa Física o si son almacenados en un buffer. La decisión de transmitir o pausar los paquetes se realiza en base a la calidad del enlace D2D. El módulo implementado comprueba cada T_{Buffer} segundos si la calidad del enlace ha mejorado y si los paquetes pausados pueden ser transmitidos. Además, se ha implementado un módulo que se encarga de registrar el valor del RSSI y del tiempo de recepción de cada paquete enviado por el otro dispositivo móvil del enlace D2D (Fig. 1.b).

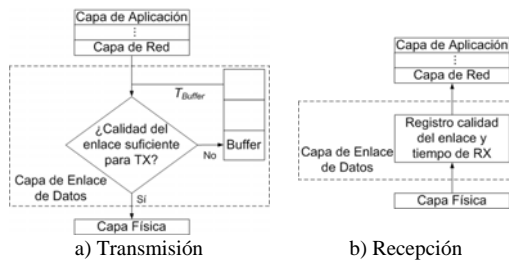


Fig. 1. Esquema de transmisión oportunisto implementado basado en la calidad del enlace.

El esquema oportunisto implementado mejora la eficiencia y el rendimiento de las comunicaciones D2D evitando transmisiones innecesarias (e ineficientes) cuando la calidad del enlace no es buena. Para ello, se establece un umbral de RSSI ($RSSI_{thr}$), y el esquema implementado pausa la comunicación D2D entre los dispositivos móviles cuando la calidad del canal medida se encuentra por debajo de $RSSI_{thr}$. Teniendo en cuenta la variación rápida de la calidad de los enlaces radio, el esquema propuesto no pausa la transmisión cuando detecta un valor de RSSI por debajo de $RSSI_{thr}$ sino cuando el valor medio de RSSI medido, $RSSI_{avg}$, en los últimos Nb_Rx paquetes registrados es menor que $RSSI_{thr}$. También es importante considerar que la condición de visión directa (*Line-Of-Sight*, LOS) entre los dispositivos móviles que establece el enlace D2D puede perderse de manera intermitente por la presencia de peatones o vehículos que provoquen desvanecimientos del nivel del RSSI. Teniendo en cuenta este tipo de inconvenientes, el esquema propuesto permite $Nb_BelowThr$ de valores de $RSSI_{avg}$ consecutivos por debajo de $RSSI_{thr}$ antes de pausar la transferencia de datos entre ambos dispositivos móviles. Si se produce una desconexión en la comunicación D2D no se recibirán paquetes con los que actualizar la estimación de la calidad del enlace. Para evitar transmitir cuando ocurre esta situación, el esquema oportunisto propuesto monitoriza el tiempo transcurrido desde la recepción del último paquete. Si el tiempo transcurrido es mayor que $T_{Disconnection}$, la transmisión de paquetes de datos también se pausa. La comunicación se reanuda cuando el $RSSI_{avg}$ calculado vuelve a estar por encima de $RSSI_{thr}$.

III. IMPLEMENTACIÓN HARDWARE

Las plataformas *Software Define Radio* (SDR) están siendo extensamente utilizadas para la implementación y evaluación de técnicas de comunicación *cross-layer* [9]. Estas plataformas SDR presentan la gran ventaja de permitir una configuración total de los protocolos de comunicación. No

obstante, con plataformas SDR, supone un verdadero desafío alcanzar niveles de rendimiento similares a los obtenidos con dispositivos hardware comerciales debido a los tiempos de procesamiento del software [9]. Para evitar estas diferencias, en este trabajo se ha modificado el protocolo IEEE 802.11 implementado en distribuciones de Sistema Operativo abierto, llevando a cabo por primera vez un esquema oportunista para comunicaciones D2D sobre el Kernel de Linux. El esquema está actualmente implementado en dos ordenadores portátiles con Ubuntu 13.04 (versión del Kernel 3.8.9-19). El esquema opera en la capa de Enlace de Datos (Fig. 1) y concretamente en la subcapa de Control de Acceso al Medio (<linux/net/mac80211>). La implementación utiliza el proyecto Backports [10] que facilita y acelera las modificaciones en el módulo <mac80211> del Kernel.

Los cambios realizados en el proceso de recepción en la capa MAC (Fig. 1.b) se han implementado en el archivo <rx.c>. En concreto, en la función <ieee80211_rx()> se han añadido los cambios necesarios para registrar el nivel del RSSI y el tiempo de recepción de los paquetes recibidos.

Los cambios realizados en el proceso de transmisión del nivel MAC, relativos al módulo de decisión sobre la transmisión o el almacenamiento de los paquetes en base a la calidad del enlace (Fig. 1.a), se han implementado en el archivo <tx.c>, en la función <ieee80211_tx_frags()>. Cada vez que un paquete de datos llega a esta función, se evalúa la calidad del enlace D2D. Si la calidad del canal es adecuada, el paquete se envía a las capas inferiores utilizando la función <drv_tx()>. En caso contrario, el paquete se almacena en un buffer implementado con la herramienta *Work Queue* (WQ). WQ es un gestor de interrupciones diferibles en el tiempo definida en el Kernel. Esta herramienta permite definir funciones que se ejecutarán cierto tiempo después de que la interrupción se lance, T_{Buffer} en este caso. Cuando T_{Buffer} expira, se vuelve a evaluar la calidad del enlace D2D y se decide si el paquete pausado se transmite o se vuelve a encolar.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A. Configuración

El esquema de transmisión D2D oportunisto basado en la calidad del enlace utiliza los parámetros definidos en la Sección II para tomar la decisión. Se ha configurado T_{Buffer} a 1s considerando la velocidad a la que varía la calidad del enlace y el coste que puede suponer evaluar dicha variación. $T_{Disconnection}$ se ha fijado a 1.5s para detectar desconexiones entre los dispositivos. Los valores de los parámetros de evaluación de calidad del enlace se han establecido a partir de pruebas experimentales. Sin embargo, el proceso completo de establecimiento de dichos valores no se puede mostrar en este trabajo por restricciones de espacio. Los equipos portátiles usados para las pruebas incorporan tarjetas inalámbricas Ubiquiti SR71x con el chipset AR9280 de Atheros y se usa IEEE 802.11g en la banda de 2.4GHz. El ajuste de los parámetros se realizó tratando de mejorar el *throughput* y el *Packet Error Rate*, PER. En primer lugar, se evaluó el rendimiento de la transmisión D2D considerando distintos valores de $RSSI_{thr}$ cuando uno de los dispositivos móviles que forma el enlace D2D se aleja del otro en condiciones LOS. En base a los resultados obtenidos, se ha utilizado un valor de $RSSI_{thr}$ igual a -74dBm, valor que permite establecer enlaces D2D de larga distancia con un buen rendimiento antes de pausar la transmisión por la degradación del canal por debajo

del umbral. Para establecer los valores de Nb_Rx y $Nb_BelowThr$ se realizaron pruebas bajo condiciones LOS interrumpidas por obstáculos móviles y no LOS (NLOS). El valor óptimo de estos parámetros depende en gran medida del escenario considerado. Como solución de compromiso se ha optado por establecer Nb_Rx a 7 (valor que permite minimizar el efecto adverso de las oscilaciones del RSSI y ajustarse a los cambios de tendencia de la señal), y $Nb_BelowThr$ se ha fijado a 3 (el cual permite evitar pausas por obstáculos móviles de corta duración pero realizará pausas ante obstáculos de media y larga duración). Se podría haber realizado un mayor número de pruebas para mejorar el ajuste de los parámetros de decisión del esquema propuesto, o incluso la implementación de un sistema adaptativo en base al contexto para mejorar el rendimiento obtenido (el coste del sistema adaptativo también debería ser considerado). Aun teniéndolo presente, las pruebas realizadas son suficientes para alcanzar una configuración adecuada y demostrar experimentalmente los beneficios de energía, capacidad y QoS que ofrece el uso de esquemas de transmisión D2D oportunistas. Además, es importante resaltar que todas las configuraciones evaluadas proporcionan un incremento del rendimiento con respecto a la implementación por defecto de IEEE 802.11.

B. Escenario de evaluación

El rendimiento del esquema de transmisión D2D oportunista ha sido evaluado en el escenario mostrado en la Fig. 2. En este escenario los dispositivos (Nodo A y Nodo B) mantendrán una separación constante (30 y 50 metros en diferentes pruebas) durante toda la transmisión. Al inicio de cada prueba ambos se comunican en condiciones LOS, condición que se mantiene hasta que el Nodo A gira la esquina. A partir de ese momento, la comunicación se mantiene bajo condiciones NLOS hasta que el Nodo B gira la esquina. La duración de las pruebas viene dada por el tiempo necesario para transmitir un archivo de 25Mbytes del Nodo B al Nodo A (la transferencia del fichero se realizará usando aplicación UDPCast). Las pruebas se desarrollan usando los equipos citados en el apartado anterior.

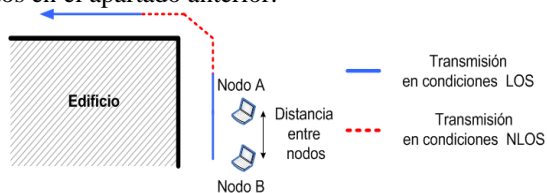


Fig. 2. Escenario de evaluación.

C. Eficiencia energética

El esquema oportunista implementado ha sido diseñado para evitar transmisiones innecesarias e ineficientes cuando la calidad del enlace se degrada. La transmisión bajo condiciones desfavorables del enlace D2D puede conllevar un elevado número de retransmisiones y el uso de modos de transmisión con bajo *throughput* y alto consumo energético. Estas desventajas pueden evitarse posponiendo la transmisión hasta que las condiciones del canal mejoren. Para analizar el beneficio en términos de consumo energético que podría alcanzarse con el uso de esquemas oportunistas, se considera el número total de paquetes radio necesario para transmitir el fichero, incluyendo las retransmisiones.

La Fig. 3.a muestra el número total de paquetes transmitidos para transferir los 25Mbytes utilizando la implementación por defecto de 802.11 en Linux (*Defecto*) y la

modificación del protocolo que incorpora el esquema oportunista propuesto (*Oportunista*). Los resultados de la Fig. 3.a muestran que la implementación *Oportunista* reduce el número de paquetes necesarios en un 27% y 21%, comparándolo con la implementación por *Defecto* cuando la distancia entre los dispositivos móviles es de 30m y 50m respectivamente. La disminución del beneficio cuando la separación entre los dispositivos móviles es 50m se debe a la degradación del enlace por la distancia. El beneficio resultante se debe a la reducción del número de retransmisiones que se consigue al evitar transmitir cuando las condiciones del canal no son favorables. Este hecho se observa en la Fig. 3.b, la cual muestra la relación entre el número de paquetes retransmitidos y el tiempo efectivo de transmisión o *airtime*. El *airtime* representa el tiempo efectivo durante el cual se usa el canal radio en la comunicación (incluyendo el tiempo requerido para retransmisiones). El *airtime* considera el tiempo requerido para el envío de los paquetes por el canal, el cual depende de la longitud de cada paquete, del modo de transmisión empleado y de los tiempos inter-trama y de contención de cada estándar (SIFS, DIFS, *ACK time* y *Congestion Window*) [4]. La Fig. 3.b muestra que la diferencia entre la implementación por *Defecto* y *Oportunista* es de un 70% y un 43%, lo que demuestra que usando esquemas de transmisión D2D oportunistas se puede mejorar la eficiencia energética evitando retransmisiones.

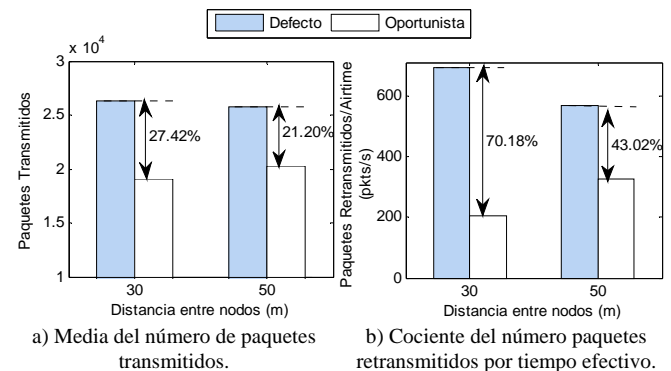


Fig. 3. Comparativa del rendimiento energético entre la implementación por defecto de 802.11 y la implementación que utiliza el esquema oportunista.

D. Capacidad

Al reducir el número de transmisiones ineficientes también se reduce la ocupación del canal, y por tanto, se mejora la capacidad del sistema. La ocupación del canal se ha medido en las pruebas a través del *airtime*. La Fig. 4.a muestra el valor medio de *airtime* necesario para transmitir el fichero de 25Mbytes, mientras que la Fig. 4.b muestra el valor medio de *airtime* correspondiente al área en el que la transmisión se realiza bajo condiciones NLOS (Fig. 2). Los resultados de la Fig. 4.a muestran que el uso del esquema oportunista reduce la ocupación del canal en un 30% cuando la distancia entre los dispositivos es de 30m. La misma reducción se consigue incluso cuando la distancia entre dispositivos móviles es de 50 metros, donde la calidad del enlace empeora y se utilizan modos de transmisión más robustos, lo que conlleva un aumento del *airtime* de los paquetes. Los resultados mostrados en la Fig. 4.b reflejan que la ocupación del canal en condiciones NLOS se ve reducida en un 60% con la implementación *Oportunista* respecto a la implementación por *Defecto*. También es interesante aclarar porqué el *airtime* es menor cuando la distancia entre los dispositivos móviles es de 50m. En el caso de la implementación por *Defecto*, el *airtime*

se reduce debido a que se produce una desconexión entre los dispositivos por la fuerte degradación del enlace. En el caso de la implementación *Oportunista*, la reducción del *airtime* se debe a que la calidad del canal se registra por debajo del umbral establecido con mayor facilidad debido a la degradación acentuada por la distancia. Es importante resaltar que el uso del esquema oportunista no ha incrementado el tiempo necesario para transmitir el fichero de 25 Mbyte: el esquema oportunista reduce el tiempo de transmisión respecto a la configuración por defecto de 56.8s a 55.8s y de 82.3s a 75.8s cuando las distancias son de 30 y 50m respectivamente.

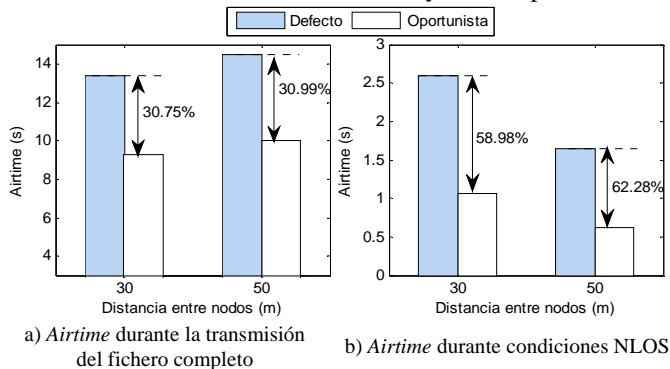


Fig. 4. Comparativa del *Airtime* entre la implementación por defecto de 802.11 y la implementación que utiliza el esquema oportunista.

E. Calidad de Servicio

En este apartado se analiza la calidad de servicio experimentada en la transmisión D2D en términos de *throughput*. El *throughput* en este estudio se ha calculado como el ratio entre los bytes de datos de aplicación correctamente recibidos y el *airtime* requerido para recibir esta información en el Nodo A (incluyendo el tiempo necesario por las retransmisiones) [4]. La Fig. 5 muestra la función de distribución acumulada (*Cumulative Distributed Function*, CDF) del *throughput* experimentado durante las pruebas con las implementaciones por *Defecto* y *Oportunista*. Los resultados obtenidos reflejan que cuando la distancia entre los dispositivos móviles es igual a 30m, Fig. 5.a, el 50% de las transmisiones experimenta un *throughput* igual o superior a 7.5 Mbps con la implementación por *Defecto*, mientras que este valor se incrementa un 166% (el valor experimentado en el *throughput* es igual o superior a 20Mbps) cuando se utiliza la implementación *Oportunista*. Tendencias similares se observan cuando la distancia es de 50m.

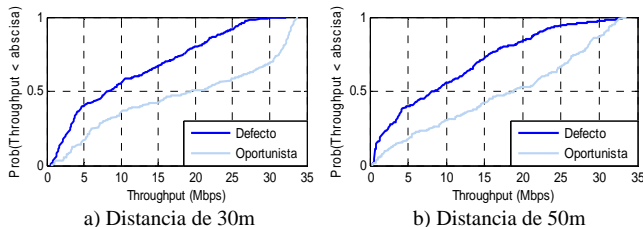


Fig. 5. CDF del *throughput* durante la transmisión D2D.

La mejora del *throughput* experimentado con la configuración *Oportunista* se obtiene como consecuencia de una buena calidad del enlace cuando se permite la comunicación, lo que también implica una reducción del PER y un incremento del uso de modos de transmisión que utilizan mayores tasas de transferencia. Por ejemplo, con la implementación *Oportunista*, el 68% de los paquetes transmitidos se transfería con un *Data Rate* superior a 48Mbps cuando la distancia era de 30m. Este porcentaje se reduce al

55% cuando se utiliza la implementación por *Defecto*. En cuanto a la media del PER experimentado durante la transmisión de los 25Mbytes, se redujo del 53.48% obtenido con la implementación *Defecto* al 38.71% cuando se utilizó implementación *Oportunista*. Tal y como se ha demostrado, este mecanismo también mejora el *throughput* experimentado durante la comunicación (como consecuencia reduce el *airtime*, sección IV.D).

V. CONCLUSIONES

El uso de esquemas de transmisión oportunistas puede ayudar a la mejora de la eficiencia, la fiabilidad y el rendimiento de las comunicaciones D2D. Esto se ha demostrado en este trabajo a través de una innovadora plataforma que utiliza hardware comercial y modifica el Kernel de Linux para implementar una técnica *cross-layer* de gestión oportunista de la transmisión en comunicaciones D2D que basa su decisión en la calidad del enlace experimentada. El esquema de transmisión D2D oportunista implementada utiliza el RSSI de los paquetes recibidos para monitorizar la calidad del enlace y determinar cuándo se ha de pausar la transmisión de datos para evitar comunicaciones innecesarias e ineficientes. El estudio presentado ha demostrado experimentalmente que los esquemas oportunistas pueden reducir significativamente el consumo energético y la ocupación del canal (que supone un incremento de la capacidad) y mejora la QoS de las comunicaciones D2D.

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

- [1] P. Phunchongharn, E. Hossain y D.I. Kim, "Resource allocation for device-to-device communications underlying LTE-advanced networks", *IEEE Wireless Communications*, vol. 20, no. 4, pp. 91-100, Ago. 2013.
- [2] 3GPP TR 22.803. Technical Specification Group Services and System Aspects; Feasibility study for Proximity Services (ProSe). Mzo. 2013.
- [3] B. Coll-Perales, J. Gozalvez y J. Sánchez-Soriano, "Empirical Performance Models for P2P and Two Hops Multi-hop Cellular Networks with Mobile Relays", *Proceedings of the 8th ACM Workshop on Performance Monitoring, Measurements and Evaluation of Heterogeneous Wireless and Wired Networks (PM2HW2N-2013)*, 3-8 Nov, Barcelona (España).
- [4] Y. Xiao y J. Rosdahl, "Throughput and Delay Limits of IEEE 802.11" *IEEE Communications Letters*, vol. 6, no. 8, pp. 355-357, Ago. 2002.
- [5] Cisco Visual Networking Index. 2013. Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2012-2017. Feb. 2013. Cisco White Paper.
- [6] M.I. Poulakis, A.D. Panagopoulos y P. Constantinou, "Channel-Aware Opportunistic Transmission Scheduling for Energy-Efficient Wireless Links", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 1, pp. 192-204, Ene. 2013
- [7] N. Zlatanov, R. Schober y P. Popovski, "Throughput and Diversity Gain of Buffer-Aided Relaying", *Proceedings of the IEEE GLOBECOM*, pp. 1-6, Houston (USA), Dic. 2011.
- [8] N. Zlatanov, R. Schober y P. Popovski, "Buffer-Aided Relaying with Adaptive Link Selection", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 8, pp. 1530-1542, Ago. 2013.
- [9] J.R. Gutierrez-Agullo, B. Coll-Perales y J. Gozalvez, "An IEEE 802.11 MAC Software Defined Radio Implementation for Experimental Wireless Communications and Networking Research", *Proceedings of the 2010 IFIP/IEEE Wireless Days (WD'10)*, pp. 1-5, Venecia (Italia), Oct. 2010.
- [10] Grupo Backport, página web oficial (acesible online: Feb. 2014): <http://drvbp1.linux-foundation.org/~mcgrof/rel-html/backports/>