

Plataforma Hardware Reconfigurable para el Estudio de Comunicaciones 802.11 Multi-Hop

Juan Ramón Gutiérrez-Agulló, Baldomero Coll-Perales y Javier Gozávez

bcoll@umh.es, j.gozalvez@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- Wireless mesh technology has recently emerged as a solution for the establishment of dynamic peer-to-peer and multi-hop networks where the nodes themselves are in charge of managing advanced communications and networking functions. Wireless mesh networks are expected to become a fundamental part of forthcoming technologies such as multi-hop cellular networks, but advanced cooperative and cross-layer communication and networking techniques need yet to be investigated. Most of related studies conducted to date are based on analytical and simulation techniques where assumptions and simplifications are commonly made. To increase the reliability and validity of these studies the use of commercial hardware equipment would be required, although it presents also certain limitations in terms of flexibility. To implement a hardware testbed platform with full access and reconfigurability one of the alternatives is Software Defined Radio (SDR). In this context, this paper presents the first implementation of a fully programmable 802.11 SDR platform that incorporates mandatory and advanced mesh functionalities based on the IEEE 802.11s standard. The paper also validates the implementation through field testing trials.

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los avances más importantes dentro del campo de las comunicaciones ad-hoc inalámbricas se ha producido gracias al desarrollo del estándar IEEE 802.11s [1], el cual define múltiples y novedosos mecanismos para establecimiento de redes malladas o redes *mesh*. Las redes *mesh* permiten la auto-formación de caminos entre nodos *mesh* (*Mesh Point*, MP) a través de topologías de múltiples saltos (*multi-hop*) auto-configurables en sistemas distribuidos inalámbricos. El estándar IEEE 802.11s es un claro candidato tecnológico para las comunicaciones *multi-hop* inalámbricas de tecnologías emergentes como las redes celulares de múltiples saltos o *Multi-hop Cellular Networks* (MCN) [2], dado su potencial para extender el radio de cobertura de las estaciones base celulares más allá de los límites convencionales, e incrementar la tasa de transmisión y minimizar el consumo energético al reducir las distancias de comunicación en cada enlace *multi-hop*. Numerosos estudios han demostrado las ventajas de las redes *mesh* inalámbricas, sin embargo, la mayoría de estos trabajos están basados en técnicas analíticas y de simulación, y por lo tanto carecen de total fiabilidad por las necesarias asunciones y simplificaciones con respecto a las condiciones de propagación y operación. En este contexto, la comunidad investigadora está promoviendo la necesidad de implementar funcionalidades *multi-hop* inalámbricas en plataformas hardware, usando tanto tarjetas comerciales 802.11 previstas

de controladores *open-source*, o plataformas radio implementadas en software (*Software Defined Radio*, SDR).

Las plataformas de controladores *open-source* se encuentran limitadas por la escasa flexibilidad ofrecida por las tarjetas comerciales 802.11. Generalmente, en la arquitectura de estas plataformas la capa física está integrada dentro del chip de la tarjeta y por lo tanto es inaccesible para los usuarios. Las funcionalidades de la capa MAC están lógicamente separadas en dos módulos, dependiendo de las restricciones temporales de las tareas desarrolladas. El módulo inferior de la capa MAC, implementado en hardware en la propia tarjeta inalámbrica, se encarga de las funciones críticas temporales. Por otro lado, el módulo superior de la MAC, incluido en el núcleo del sistema operativo, es responsable de funciones más tolerantes a retrasos. Por lo tanto, y a pesar de la compatibilidad con los estándares IEEE 802.11 que asegura el trabajar con plataformas de controladores *open-source*, las limitaciones de acceso a la capa MAC y el inexistente control de la capa física impiden el desarrollo de avanzados mecanismos de comunicación con este tipo de plataformas.

Una alternativa viable y atractiva para proporcionar a las plataformas hardware con total acceso y reconfigurabilidad es el la tecnología SDR. SDR es un tipo de sistema radio que sustituye los componentes hardware por implementaciones software en ordenadores personales o PCs. La arquitectura SDR es totalmente accesible, lo cual proporciona la flexibilidad necesaria para facilitar el diseño de novedosos mecanismos de comunicación. En el mercado es posible encontrar diferentes plataformas SDR con diferentes capacidades de operación, tales como WARP, SORA y USRP.

En este contexto, este trabajo presenta la primera implementación del estándar IEEE 802.11s en una plataforma SDR reconfigurable. En particular, la implementación propuesta incluye los mecanismos de establecimiento de la red *mesh*, de selección y gestión de MPs vecinos, de selección de ruta y retransmisión de datos *multi-hop*, y de control de acceso al medio inalámbrico. Para demostrar que la implementación sigue las normas indicadas en el estándar IEEE 802.11s, este trabajo también presenta diversas pruebas de validación que se han llevado a cabo. Además, el potencial de la plataforma propuesta para llevar a cabo estudios avanzados de comunicaciones 802.11 *multi-hop*, se demuestra mediante la implementación y validación experimental a través de pruebas de campo de un novedoso mecanismo de enrutamiento basado en localización.

II. PLATAFORMA SDR PARA EL ESTUDIO DE REDES MESH

Este trabajo está basado en la segunda versión de USRP (USRP2) dada su rápida conexión con el PC en el que corre el software a través de Gigabit Ethernet, y debido a que su potencia de procesamiento depende de la CPU del PC y esta está continuamente en evolución. El código de la implementación está disponible a través de la URL: <http://www.uwicore.umh.es>.

A. Arquitectura de la plataforma SDR

La plataforma hardware SDR propuesta en este trabajo está compuesta por un PC de propósito general y una interfaz radio programable URSP2 (Fig.1), ambos conectados mediante Gigabit Ethernet. La placa USRP2 incorpora el transceptor XCVR2450 y la antena VER2450 que actúan en las bandas ISM de 2.4GHz y 5GHz. Como se puede apreciar en la Fig.1, en la arquitectura SDR incluso la capa física se ejecuta en el PC, lo cual garantiza una total flexibilidad y configurabilidad. De hecho, la implementación propuesta incluye dos capas físicas distintas (GMSK y OFDM PHY). La opción OFDM PHY incluye codificador estándar IEEE 802.11a/g/p desarrollado a partir del trabajo [3], pero que por el momento únicamente incorpora la cadena de transmisión. La opción GMSK PHY, desarrollada a partir de las herramientas de GNURadio, sí incluye las cadenas de transmisión y recepción, y por ello permite utilizar la plataforma como un nodo SDR totalmente interactivo. La capa MAC implementada incluye la función de coordinación distribuida (*Distributed Coordination Function, DCF*), que se basa en el mecanismo *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA)*, para regular el acceso al canal compartido inalámbrico. Además, la capa MAC incorpora las principales funcionalidades del estándar IEEE 802.11s, lo que hacen a esta plataforma única para el estudio de mecanismos de comunicación *multi-hop*. Finalmente, se ha implementado una capa superior (*Upper Layer, UL*) que se encarga de la generación/almacenamiento del tráfico de datos enviado/recibido por la capa MAC. El uso de sockets TCP para comunicar las diferentes capas asegura fiabilidad en la comunicación y facilita la portabilidad de la implementación propuesta con otras plataformas SDR.

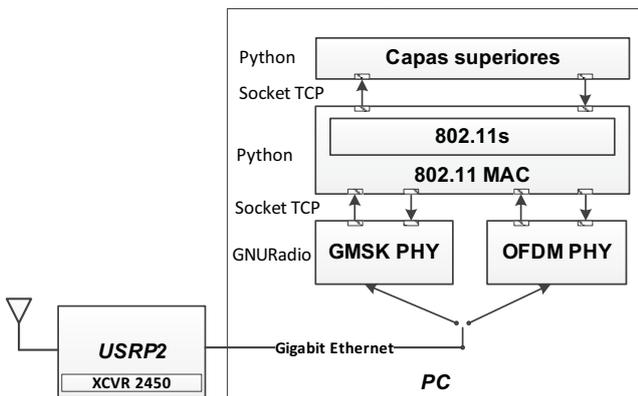


Fig. 1. Arquitectura de la implementación SDR.

B. Implementación de la capa MAC IEEE 802.11 con funcionalidades mesh en tecnología SDR

La capa MAC implementada desarrolla el mecanismo CSMA/CA para regular el acceso al medio inalámbrico, mientras que sus funcionalidades se han evolucionado a través de la incorporación de algunos mecanismos propuestos en el estándar IEEE 802.11s que permiten el establecimiento

de la red mesh, la gestión de los nodos MP, el establecimiento de rutas *multi-hop* y el envío de datos a través de la ruta establecida. Todas estas funcionalidades han sido implementadas en lenguaje Python y siguiendo un diseño de máquina de estados que de modo general puede resumirse en el diagrama de la Fig.2.

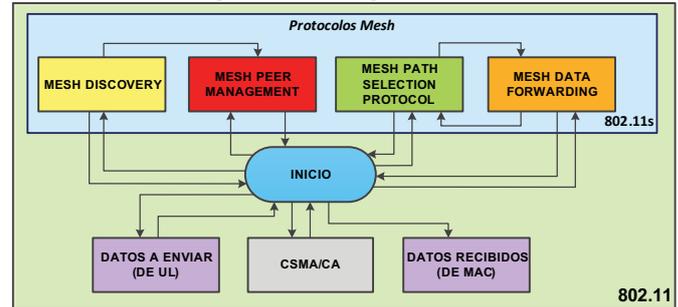


Fig. 2. Implementación SDR de la capa MAC 802.11 con funcionalidades mesh.

▪ CSMA/CA

La implementación del mecanismo CSMA/CA se ha realizando considerando la máquina de estados propuesta por Cisco en [4], pero incorporando funcionalidades tales como los mecanismos de retransmisión y fragmentación de paquetes. La máquina de estados propuesta implementa tanto la función de sensado de canal para determinar si el canal está libre u ocupado, y el mecanismo de *back off* para evitar la colisión de paquetes provocada por la transmisión simultánea de múltiples nodos. El mecanismo *Request to Send/Clear to Send (RTS/CTS)* se ha implementado para solucionar los problemas de terminal expuesto/escondido de las redes inalámbricas, y para reservar el canal durante el periodo *Network Allocation Vector (NAV)*.

▪ Mesh Discovery

El mecanismo *Mesh Discovery* permite descubrir a otras estaciones vecinas MP que se encuentren en la red. Este trabajo implementa el modo pasivo de descubrimiento de la red *mesh*, que se basa en el envío periódico (con un intervalo configurable, *Beacon Interval*) de mensajes de señalización *beacon* entre los nodos vecinos. El mecanismo implementado también incorpora un proceso de escaneo para detectar los mensajes *beacon* transmitidos por las estaciones MP vecinas. Todas las estaciones MP detectadas se incorporan a la tabla de vecinos. El conjunto completo de la tabla de vecinos representa los MP candidatos a formar parte de un subconjunto limitado de vecinos seleccionados o *peer MP*.

▪ Mesh Peer Management

El estándar IEEE 802.11s indica que el conjunto de vecinos *peer MP* seleccionados debe ser limitado (*MAX_PEERS*), pero no indica el criterio para la selección de los mismos. Inicialmente este trabajo propone un mecanismo de selección aleatorio, aunque se pueden incorporar mecanismos avanzados con facilidad en la plataforma. La importancia de la selección de vecinos dentro del funcionamiento de las redes *mesh* es primordial, puesto que los nodos MP únicamente pueden comunicarse con aquellas estaciones vecinas seleccionadas como *peer MP*. El mecanismo *Mesh Peer Management (MPM)* define el proceso de establecimiento, mantenimiento y ruptura de los enlaces entre las estaciones MP seleccionadas, denominados *peer links*. El proceso de establecimiento se lleva a cabo mediante un intercambio de mensajes de apertura (*mesh peer link open*) y confirmación (*mesh peer link confirm*), mientras que para la ruptura se utiliza mensajes de cierre (*mesh peer*

link close). Este mecanismo incorpora también temporizadores y procesos de retransmisión para evitar esperas infinitas ante mensajes de confirmación.

▪ *Mesh Path Selection Protocol*

El estándar IEEE 802.11s propone un mecanismo de descubrimiento de ruta denominado *Hybrid Wireless Mesh Protocol* (HWMP) que incluye tanto un mecanismo proactivo como reactivo. Este trabajo implementa el modo reactivo que se basa en una versión modificada de *Ad-hoc On-demand Distance Vector* (AODV). Este mecanismo únicamente busca y establece una ruta *multi-hop* entre las estaciones MP fuente y destino, a través de *peer links*, cuando el terminal fuente tiene información que enviar. En este caso, el nodo fuente envía en modo broadcast un mensaje de búsqueda de ruta o *Path REQuest* (PREQ) que es retransmitido por todas las estaciones vecinas. Cuando el nodo destino recibe el mensaje PREQ, éste responde con un mensaje unicast denominado *Path REPLY* (PREP). La recepción de los mensajes PREQ y PREP en los nodos intermedios les permite conocer sus nodos vecinos para el enrutamiento de la información entre las estaciones fuente y destino. El mecanismo de enrutamiento implementado también reacciona ante la detección de la ruptura de un enlace de la ruta establecida. En este caso, el nodo que lo detecta envía un mensaje *Path Error* (PERR) hacia el nodo origen, que es retransmitido por todos los nodos afectados, y en el que se indica que la ruta ya no está disponible.

▪ *Mesh Data Forwarding*

La función *Mesh Data Forwarding* es la encargada de retransmitir los paquetes de datos a través de la ruta *multi-hop* establecida desde la estación MP fuente a la estación MP destino. En caso de que no haya una ruta *multi-hop* establecida, el paquete se almacena en una cola hasta que el mecanismo de establecimiento de ruta encuentra un camino hasta el destino.

▪ *Upper Layer*

Las capas superiores (*Upper Layer*, UL) se encargan de gestionar y controlar los paquetes de datos que se van a transmitir y aquellos que se han recibido. Este trabajo ha implementado un generador de tráfico que emula *Constant Bit Rate* (CBR) y que permite definir la dirección MAC del destinatario, el tamaño del paquete y la frecuencia de generación del mismo. Los paquetes de datos generados se encolan a la espera de ser transmitidos, mientras que los paquetes recibidos se almacenan por razones de control.

III. VALIDACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN

Para validar la implementación de la capa MAC con funcionalidades *mesh* implementada se han llevado a cabo numerosos tests. En esta sección se resumen aquellos más representativos y que demuestran, por un lado, que los paquetes formados siguen la norma del estándar IEEE 802.11s, y por otro, la correcta implementación de los mecanismos *mesh*.

La primera prueba se centra en validar que los paquetes

formados en la plataforma SDR propuesta en este trabajo están correctamente formados y se pueden capturar con una tarjeta IEEE 802.11 estándar y una aplicación de sniffer que se ejecuta en un PC, y por lo tanto son compatibles con el estándar IEEE 802.11s. Para ello fue necesario utilizar una versión avanzada de la herramienta Wireshark (v.1.6.1) y una tarjeta inalámbrica configurada en la misma frecuencia de operación que la plataforma SDR (2.4 GHz) – la plataforma SDR está configurada con la capa OFDM PHY. La Fig.3 muestra los 7 diferentes paquetes que fueron capturados con Wireshark tras ser transmitidos con la plataforma SDR, incluyendo los mensajes *mesh peer link open, confirm* y *close* (No. 1, 2 y 3) de la función *Mesh Peer Management*, el mensaje *beacon* (No. 4) y los mensajes de selección de ruta PREQ, PREP y PERR (No. 5, 6 y 7). La captura de la Fig.3 también muestra como los parámetros de configuración del estándar IEEE 802.11s (*MeshID, beacon interval, mesh Local Link identifier, Originator Sequence Number, Target Sequence Number*) son también detectados por el sniffer.

La segunda de las pruebas demuestra que la implementación SDR propuesta en este trabajo es capaz de interactuar con una tarjeta 802.11 comercial en los procesos de establecimiento de *peer links*. Para ello se situó un nodo de la plataforma SDR junto a dos PCs en los que se ejecuta la implementación de Linux de 802.11s (*Open80211s*). Tanto el nodo SDR (dirección MAC: 00:50:c2:85:33:0c) como uno de los PCs (dirección MAC: 00:15:6d:84:3b:87) están situados en los extremos y sus parámetro *MAX_PEERS* están limitados a 1 para evitar la asociación entre ellos, y obligar al establecimiento del *peer link* con el segundo de los PCs situado entre ambos. Una vez terminados los procesos de *MPM*, el resultado del comando *'iw dev mesh0 mesh station dump'* en el PC intermedio se muestra en la Fig. 4. Como se puede apreciar, el nodo intermedio ha establecido satisfactoriamente (observar parámetro *mesh plink: ESTAB*) el *peer link* tanto con el otro PC como con el nodo SDR.

```
iw dev mesh0 mesh station dump
Station 00:50:c2:85:33:0c (on mesh0)
  rx bytes:      466
  tx bytes:      142
  tx packets:    2
  tx failed:     2
  signal:        -54 dBm
  signal avg:    -55 dBm
  tx bitrate:    6.0 MBit/s
  mesh llid:     56097
  mesh plid:     4369
  mesh plink:    ESTAB
Station 00:15:6d:84:3b:87 (on mesh0)
  rx bytes:      121425
  tx bytes:      142
  tx packets:    2
  tx failed:     0
  signal:        -42 dBm
  signal avg:    -40 dBm
  tx bitrate:    6.0 MBit/s
  mesh llid:     43157
  mesh plid:     52379
  mesh plink:    ESTAB
```

Fig. 4. Resultado del comando *'iw dev mesh0 mesh station dump'* ejecutado en el PC.

#	Time	Source	Destination	Protocol	MeshID	Mesh Frame Type	Target	Originator	BI	Action	LL	PL	O.SN	T.SN
1	0.000000	00:50:C2:85:33:0C	00:15:6D:84:3B:87	IEEE 802.11	uwicoreMESH	Mesh Peer Link Management				Open	0x6c66			
2	5.581987	00:50:C2:85:33:0C	00:15:6D:84:3B:87	IEEE 802.11	uwicoreMESH	Mesh Peer Link Management				Confirm	0x1111	0x1234		
3	10.288546	00:50:C2:85:33:0C	00:15:6D:84:3B:87	IEEE 802.11	uwicoreMESH	Mesh Peer Link Management				Close	0x1111	0x1234		
4	23.181676	00:50:C2:85:33:0C	FF:FF:FF:FF:FF:FF	IEEE 802.11	uwicoreMESH	Mesh Configuration			6,00064					
5	36.105903	00:50:C2:85:33:0C	FF:FF:FF:FF:FF:FF	IEEE 802.11		Mesh Path Request	00:15:6D:84:3B:87	00:15:6D:84:2F:C1					1	0
6	47.049625	00:50:C2:85:33:11	00:50:C2:85:33:10	IEEE 802.11		Mesh Path Response	00:50:C2:85:33:11	00:50:C2:85:33:0C					5	357
7	82.201030	00:50:C2:85:33:11	FF:FF:FF:FF:FF:FF	IEEE 802.11		Mesh Path Error	00:50:C2:85:32:F6							14

Fig. 3. Tramas 802.11s generadas por la plataforma SDR.

IV. IMPLEMENTACIÓN DE MECANISMOS AVANZADOS EN LA PLATAFORMA SDR

Finalmente, este trabajo pretende demostrar la capacidad de la plataforma SDR propuesta de permitir la implementación de avanzados mecanismos de comunicación y testear su rendimiento en condiciones realistas. En este contexto, se ha llevado a cabo la implementación de la técnica xLo [5], la cual es una variante del mecanismo reactivo de HWMP que se encuentra implementado en la plataforma SDR. En particular, xLo únicamente permite retransmitir el mensaje PREQ a aquellos peer MPs que representen un avance en distancia hacia el destino. Además, xLo limita el número de retransmisores que no están en la dirección del destino a un total de ' x saltos' (siendo x un parámetro configurable). La ejecución de la técnica xLo requiere que las estaciones SDR conozcan la localización de sus estaciones vecinas y del nodo SDR destino. En la implementación actual, esto se solventa cargando un mapa de localización de cada uno de los nodos SDR.

A. Escenario de las pruebas y resultados obtenidos

La comparativa entre el rendimiento de la técnica HWMP propuesta en el estándar IEEE 802.11s, y el mecanismo xLo se ha llevado a cabo en el escenario que aparece en la Fig.5, donde las estaciones fuente y destino son los nodos 1 y 6, respectivamente. Los nodos de la plataforma SDR utilizan la capa GMSK PHY y operan a 2.485GHz. Para aislar los efectos del mecanismo de establecimiento de *peer links* del proceso de búsqueda de ruta se han creado enlaces predeterminados, tal y como aparecen en la Fig.5. Por lo tanto, la comunicación entre las estaciones fuente y destino puede realizarse a través de una ruta directa de 2 saltos utilizando al nodo 3 como retransmisor, o de una ruta alternativa de 4 saltos mediante los nodos 2, 4, y 5. Es importante resaltar que la ruta de 2 saltos se ha realizado intencionadamente para que sus enlaces sean más débiles.

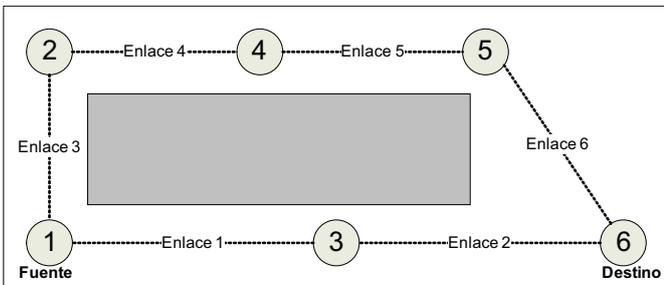


Fig. 5. Escenario de evaluación de las técnicas de enrutamiento *multi-hop*.

La Fig. 6 muestra algunos parámetros importantes para comparar el rendimiento de las rutas *multi-hop* establecidas utilizando las técnicas HWMP y xLo (las variantes ' $0Lo$ ' y ' $1Lo$ ' se ha analizado). En la Fig.6.a se representa la señalización en el proceso de enrutamiento, medida como el ratio entre el número de paquetes PREQs retransmitidos por los nodos intermedios y el número de PREQs generados por la estación fuente. En la Fig.6.b se muestra el número de mensajes PREQs que la estación fuente necesita generar para establecer la ruta *multi-hop*. Como se puede apreciar en la Fig.6.a, la técnica HWMP realiza el proceso de búsqueda de ruta en todas direcciones, de ahí el elevado número de mensajes PREQ retransmitidos por los nodos intermedios, y finalmente selecciona la ruta *multi-hop* que primero llega a la estación destino. Por otro lado, la técnica $0Lo$ únicamente puede establecer la ruta a través del camino directo, ya que el

nodo 2 no representa un avance hacia el destino. Por lo tanto, el límite máximo de mensajes PREQ retransmitidos por los nodos intermedios es de 1 (en la Fig.6.a se puede apreciar como es inferior por las malas condiciones de la ruta directa). En estas condiciones de operación, la técnica $0Lo$ reduce considerablemente la señalización en el proceso de establecimiento de ruta en comparación con HWMP. Sin embargo, el hecho de que los enlaces que componen la ruta directa se hayan diseñado intencionadamente más débiles provoca que la técnica $0Lo$ requiera un mayor número de mensajes PREQ para establecer la ruta *multi-hop* entre las estaciones fuente y destino (ver Fig.6.b). Para buscar un compromiso entre eficiencia y rendimiento, las técnicas xLo son capaces de adaptar su rendimiento, y en este caso, ofreciendo ' $1 salto$ ' ($1Lo$) al mensaje PREQ son capaces de obtener el mismo rendimiento que la técnica HWMP. Esto es debido a que el enlace entre los nodos 1 y 2 (*enlace 3*) no representa un avance en distancia hacia el destino, y por lo tanto la técnica xLo requiere de ' $1 salto$ ' para propagar el mensaje PREQ por la ruta alternativa.

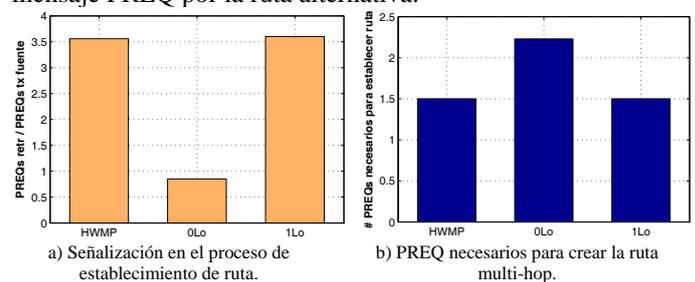


Fig. 6. Evaluación de los mecanismos de selección de ruta *multi-hop*.

V. CONCLUSIONES

Este trabajo ha presentado la primera implementación conocida en la comunidad investigadora del estándar IEEE 802.11s para el establecimiento de redes *mesh* en tecnología SDR. Además de mostrar las funcionalidades *mesh* implementadas, este trabajo ha validado la implementación a través de pruebas de campo, demostrando la capacidad de la plataforma SDR propuesta de interactuar con tarjetas comerciales IEEE 802.11. Finalmente se ha demostrado el potencial único de la plataforma SDR propuesta de permitir la implementación de mecanismos avanzados de comunicación y el testeo de su rendimiento en condiciones realistas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en parte por el Ministerio de Ciencia e Innovación (TEC2008-06728), el Ministerio de Economía y Competitividad y los Fondos FEDER (TEC2011-26109), y la Generalitat Valenciana (ACIF/2010/161). Los autores también agradecen el apoyo de Orange España.

REFERENCIAS

- [1] IEEE 802.11s standard. Part 11: Wireless LAN MAC and PHY Layer specifications. Amendment 10: Mesh Networking, 2011.
- [2] L. Long et al, "Multihop cellular networks: potential gains, research challenges, and a resource allocation framework," *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 9, pp. 66-73, 2007.
- [3] P. Fuxjäger et al., "IEEE 802.11p transmission using GNURadio," in *Proc. 6th IEEE Karlsruhe Workshop on Software Radios*, Germany, March 2010, pp. 83-86.
- [4] P. Roshan and J. Leary, "802.11 Wireless LAN Fundamentals," first ed., *Cisco Press*, Indianapolis, Indiana, 2003.
- [5] B. Coll-Perales and J. Gozalvez, "Energy efficient routing protocols for multi-hop cellular networks," in *Proc. 20th IEEE PIMRC*, Japan, Sept. 2009, pp. 13-16.