

Influencia de la Directividad en el Rendimiento de Protocolos Ad-hoc de Enrutamiento para Redes Multi-Hop Celular

Baldomero Coll Perales y Javier Gozávez Sempere

Ubiquitous Wireless Communications Research Laboratory

Uwicare, <http://www.uwicore.umh.es>

Universidad Miguel Hernández de Elche

Avda de la Universidad, s/n, 03202 Elche, España

Mail: bcoll@umh.es, j.gozalvez@umh.es, tlf:+34 966658955

Resumen—El rendimiento de los algoritmos de enrutamiento para redes inalámbricas multi-hop tiene una alta dependencia con la función de costes establecida para definir la ruta óptima. En las redes Multi-Hop Celular, la transmisión entre terminal móvil y estación base se realiza utilizando nodos retransmisores. En este contexto, este artículo propone la utilización de la direccionalidad hacia el destino como parámetro a considerar en la selección de la ruta entre origen y destino para algoritmos de enrutamiento multi-hop en redes MCN. Los resultados obtenidos demuestran que la consideración de la direccionalidad incrementa la eficiencia del protocolo de enrutamiento al reducir de forma notable la señalización y energía consumida en el proceso de enrutamiento.

Palabras clave—redes MCN, enrutamiento ad-hoc, función de costes, direccionalidad al destino

I. INTRODUCCION

Según define la Unión Internacional de las Telecomunicaciones (UIT) [1], la futura generación de redes celulares (4G) deberá proveer de altas tasas de transmisión en amplias zonas y de forma homogénea. Las actuales redes celulares, denominadas también de único salto (*Single-hop Cellular Network*, SCN) debido a que la comunicación se realiza de un modo directo entre el terminal móvil y la estación base (*Base Station*, BS), son incapaces de ofrecer altas tasas de transmisión de forma homogénea en su celda de cobertura, debido a la creciente atenuación de la señal a medida que aumenta la distancia entre el terminal móvil y la BS, y la dependencia de la tasa de transmisión con dicha distancia o atenuación de la señal. La consecución de los objetivos establecidos por la UIT para la 4G pasan por la instalación de un mayor número de BS, y/o hacer uso de la tecnología ad-hoc. La instalación de un mayor número de BS cuenta con el consecuente gasto económico, además del creciente rechazo social ante la instalación de elementos radiantes. La solución que parece estar tomando ventaja consiste en alcanzar a la BS a través de múltiples saltos, dando lugar a lo que se conoce como redes MCN (*Multi-hop Cellular Network*) [2]-[3]. En las redes MCN, la comunicación entre el terminal móvil y la estación base no se realiza de forma directa sino a través de nodos de comunicación intermedios que retransmiten la información del nodo fuente hacia el nodo destino. La integración de las

comunicaciones ad-hoc en las redes celulares permite la reducción de la distancia entre cada uno de los saltos participantes en la comunicación entre origen y destino, con lo que se mejoran las condiciones de propagación, el nivel de señal recibida, y consecuentemente las tasas de transmisión.

Dentro de las redes MCN pueden diferenciarse entre las que emplean retransmisores fijos (MCN-Fixed Relay, MCN-FR), y las que usan a los propios terminales móviles como retransmisores (MCN-Mobile Relay, MCN-MR). Si bien la complejidad del diseño y desarrollo de las redes MCN-FR es notablemente más baja que la de las redes MCN-MR, presentan el inconveniente de un mayor coste económico al requerir de la instalación de nuevos nodos retransmisores, y esto en un entorno de creciente rechazo a las antenas de telefonía móvil y comunicaciones inalámbricas. Por el contrario, las redes MCN-MR explotan la capacidad de los terminales móviles para optimizar el rendimiento de las redes de comunicaciones móviles a través de protocolos multi-hop, que integran los sistemas celulares y ad-hoc, y sin la necesidad de desplegar nuevos elementos radiantes. Sin embargo, el adecuado desarrollo y despliegue de redes MCN-MR requiere todavía de superar importantes retos tecnológicos, como el de la selección de rutas entre los nodos origen y destino eficientes, robustas, y que no requieran de un alto consumo energético por parte de los nodos retransmisores. En este contexto, el presente artículo se centra en el estudio y desarrollo de algoritmos de enrutamiento en redes MCN-MR que permitan seleccionar las posibles rutas entre los nodos origen y destino en base a unos criterios preestablecidos que explotan las características de las redes MCN-MR. En concreto, el artículo propone la consideración de la direccionalidad en el establecimiento de rutas multi-hop para así optimizar el rendimiento de las redes MCN-MR, reduciendo también la señalización requerida para el descubrimiento de rutas.

II. PROTOCOLO DE ENRUTAMIENTO AODV

A. Funcionamiento básico de AODV

El trabajo desarrollado se basa en el protocolo de enrutamiento AODV (*Ad-Hoc On-Demand Distance Vector*) [4]. AODV es un protocolo de enrutamiento reactivo que

únicamente realiza la búsqueda de la ruta entre fuente (S) y destino (D) cuando el nodo fuente S tiene información que transmitir. El proceso de creación de ruta entre los nodos S y D se basa, principalmente, en dos mecanismos: la petición de ruta por parte del nodo S , y la respuesta del nodo D . Cuando el nodo S tiene información que transmitir y no conoce el camino para llegar a D , envía en modo broadcast un paquete de petición de ruta (*Route REQuest*, $RREQ$) que es difundido por la red a través de las retransmisiones de los nodos intermedios. Cuando el $RREQ$ alcanza al nodo S , éste responde con un paquete unicast (*Route REPLY*, $RREP$) confirmando la creación de la ruta. La recepción de los paquetes $RREQ$ y $RREP$ permite, a los nodos intermedios, conocer al nodo que les precede en el camino hacia S y D respectivamente, y por lo tanto, conocer a quien deben dirigir la información para alcanzar al nodo destino.

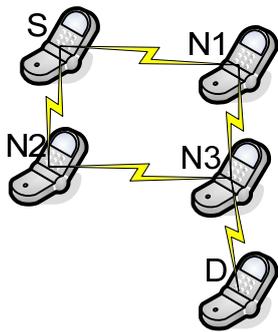


Figura 1. Ejemplo de funcionamiento de AODV

Supongamos que, como se muestra en la Figura 1, únicamente los nodos N_1 y N_2 se encuentran dentro del radio de cobertura de S . Ante la llegada del $RREQ$, tanto N_1 como N_2 comprobarán que no son el destinatario del paquete y, tras almacenar el identificador del nodo del que han recibido el $RREQ$, reenvían en modo broadcast el paquete. El envío realizado por N_1 y N_2 provoca dos nuevos eventos. Por un lado, el paquete $RREQ$ vuelve a llegar a S , que tras reconocer el paquete lo desechará. Por otro lado, tanto el $RREQ$ de N_1 como el de N_2 alcanzarán a N_3 (suponemos que N_1 y N_2 no se encuentran dentro de sus respectivos radios de cobertura). En la versión original de AODV, N_3 únicamente reenvía el primero de los $RREQ$ que escucha, el resto de $RREQ$ originados en el mismo intento de búsqueda de ruta (reconocidos con un número de secuencia) son desechados. Supongamos que el $RREQ$ enviado por N_1 alcanza antes a N_3 que el de N_2 . En ese caso, N_3 almacenará en su tabla de ruta que para llegar hasta S debe mandar el paquete por N_1 . Cuando a N_3 llegue el $RREQ$ enviado por N_2 lo descartará tras reconocer que posee el mismo número de secuencia que el que recibió anteriormente de N_1 . N_3 , por no ser el destinatario del paquete, vuelve a reenviar el $RREQ$, dándose de nuevo otras dos circunstancias. Por un lado el $RREQ$ llega a N_1 y N_2 que descartan el paquete reconociendo el número de secuencia, y por otro lado, el $RREQ$ alcanza al nodo D . El nodo D almacena en su tabla de ruta que para alcanzar al nodo S debe enviar el paquete por N_3 , además de verificar que él es el

destinatario del $RREQ$ y generar un paquete de respuesta $RREP$. Debido a que D posee una ruta para alcanzar a S (la creada con la recepción del $RREQ$), el envío del $RREP$ se realiza en modo unicast. De este modo, el paquete $RREP$ pasará de D a N_3 , de N_3 a N_1 y de N_1 a S . La llegada del $RREP$ permite a los nodos intermedios conocer la identificación del nodo que les precede en el camino hacia D , y por tanto conocer a quien deben enviar la información si se desea alcanzar a D . Así, por ejemplo, cuando N_1 recibe el $RREP$ de N_3 , provoca que N_1 almacene en su tabla de rutas que para llegar a D debe enviarle el paquete a N_3 . Cuando el $RREP$ alcanza a S , el proceso de creación de ruta concluye y da comienzo la transmisión multi-hop de la información.

B. Modificaciones del algoritmo AODV

En la versión original de AODV, la ruta escogida entre los nodos S y D es aquella que posee una menor latencia, lo cual suele coincidir con la ruta que realiza un menor número de saltos. Esto implica que no se tiene en cuenta el estado de la red a la hora de construir la ruta. Por ello, el presente artículo implementa la modificación del protocolo AODV propuesta en el estándar 802.11s, y en concreto el procedimiento de aceptación de paquetes de búsqueda de ruta propuesto en el mecanismo on-demand de enrutamiento [5]. 802.11s es un estándar creado para permitir la formación de redes mesh inalámbricas. Sus modificaciones respecto a 802.11 están centradas principalmente a nivel MAC, desarrollando funcionalidades como el descubrimiento de la red mesh, autenticación, gestión de enlaces, selección de canal, seguridad, interworking y selección de camino entre otros.

La modificación de AODV propuesta permite que la ruta de menor latencia se siga construyendo, pero ante la llegada de otro $RREQ$ con el mismo número de secuencia, la modificación implementada verifica si el coste del nuevo camino propuesto es mejor o peor que el almacenado. Para realizar el cálculo del coste del camino se emplea la función de costes que se haya definido e implementado.

Para llevar a cabo la nueva implementación es necesario incorporar en el paquete $RREQ$ un nuevo campo, en el que está almacenado el coste acumulativo de la ruta. Haciendo uso del ejemplo visto en la Figura 1, cuando N_2 y N_1 reciban el $RREQ$ proveniente de S ambos calculan el coste del enlace con S . El valor del coste del enlace es almacenado tanto en la tabla de ruta como en el $RREQ$. Igual que ocurría en AODV, el $RREQ$ retransmitido por N_1 alcanza a N_3 antes que el retransmitido por N_2 . Ante la llegada del $RREQ$, N_3 calcula el coste del enlace con N_1 y, al tratarse de un nuevo número de secuencia, almacena en la tabla de ruta la suma del coste del enlace con N_1 y el valor del campo de coste acumulativo que contiene el paquete $RREQ$. N_3 , tras actualizar el paquete $RREQ$ (coste acumulativo, etc.), lo retransmite. La modificación sobre AODV afecta cuando el $RREQ$ proveniente de N_2 alcanza N_3 . En la versión original de AODV sería descartado directamente. Por el contrario en la versión modificada de AODV, N_3 calcula el coste del enlace con N_2 y tras sumarlo al coste acumulativo que contiene el $RREQ$, comprueba si es mayor o menor que el que ya tiene almacenado en su tabla de ruta. En caso de que sea mayor, el

paquete es descartado, pero si el coste acumulativo de la nueva ruta es menor, el paquete será aceptado, la tabla de ruta será actualizada, y se ejecutará un nuevo reenvío del *RREQ* (Figura 2). De este modo es posible que a la estación *D* llegue más de un *RREQ*.

La principal ventaja de la modificación propuesta por 802.11s es que el *RREQ* que contienen la ruta de menor latencia (*RREQ_l*) es el primero en llegar a *D*, y al que inmediatamente se responde con el *RREP*. Pero además, se construye la ruta que mejor se adapta a las condiciones impuestas en la función de costes, ruta creada a partir del *RREQ* que minimiza la función de costes definida para el protocolo de enrutamiento (*RREQ_{min}*). Otra propiedad de la modificación es que los cambios realizados en las tablas de rutas por *RREQ_{min}* son válidos para el *RREP* que generara *RREQ_l*. Para el caso de la Figura 2, supongamos que en esas condiciones es generado el *RREP* que provoca *RREQ_l*. Cuando el *RREP* alcance a *N₃*, en la tabla de ruta se informará que para llegar a *S* el siguiente salto es *N₂*, a pesar de que la ruta creada por *RREQ_l* se había construido por *N₁*.

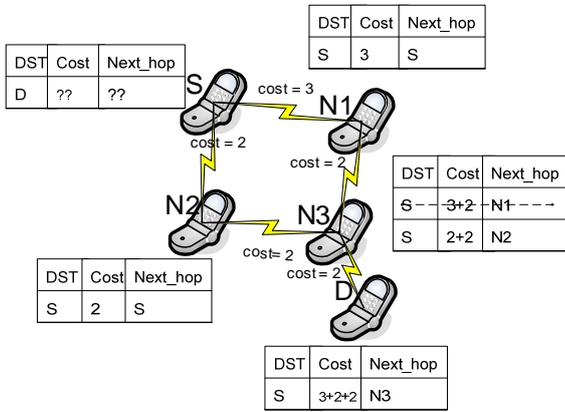


Figura 2. Ejemplo de funcionamiento de la modificación de AODV propuesta en el estándar 802.11s

III. PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO MULTI-HOP

A. Introducción

Diferentes protocolos de enrutamiento con variadas funciones de coste han sido propuestos para redes inalámbricas, y en menor medida para redes MCN. Las primeras propuestas [4]-[6], influenciadas por los mecanismo de enrutamiento para redes cableadas, consideraban únicamente el número de saltos entre las estaciones origen *S* y destino *D* como criterio para el establecimiento de la ruta. El menor número de saltos suele coincidir con la ruta de menor latencia, razón por la cual, a pesar de su sencillez, sigue siendo el número de saltos un parámetro ampliamente empleado en protocolos de enrutamiento multi-hop.

Desde entonces, numerosos parámetros han sido propuestos con la finalidad de tener en cuenta el estado de la red durante el proceso de establecimiento de la ruta, dependiendo su relevancia de las características de la red. Así, en las redes inalámbricas, aspectos como la energía [7], el nivel de

congestión [8], la tasa de paquetes erróneamente recibida o PER [9], y la tasa de transmisión o *throughput* [10], entre otros parámetros, pueden presentar un notable impacto en el eficiente establecimiento de enlaces multi-hop, y por lo tanto en el rendimiento de los protocolos de enrutamiento. Además de la definición de nuevas funciones de coste para la identificación de rutas multi-hop, investigadores han propuesto también modificaciones en los protocolos de enrutamiento más aceptados como AODV. Por ejemplo, en [11], los autores desarrollan diferentes procedimientos a seguir durante el proceso de búsqueda de ruta. En el primero de ellos, los nodos intermedios descartan cualquier paquete de búsqueda de ruta si un paquete procedente de la misma fuente ya ha sido escuchado. Por otro lado, el segundo algoritmo establece un tiempo de espera durante el cual son aceptados todos los paquetes de búsqueda de ruta, siempre y cuando el camino recorrido por el paquete posea un coste acumulativo menor.

B. Mecanismo Multi-Métricas

Con el fin de evaluar la propuesta realizada en este trabajo, es decir la consideración de la direccionalidad en el proceso de enrutamiento en las redes MCN-MR, el presente trabajo ha implementado como algoritmo base con el que realizar las comparaciones el propuesto en [12]. De igual modo que en muchas otras propuestas, [12] presenta una función de costes lineal, en la que cada uno de los parámetros que intervienen en ella están ponderados para modificar su influencia en el computo global de la función de costes. La elección del número de saltos, la congestión del canal y la energía permiten la creación de rutas teniendo en consideración las principales limitaciones de las redes inalámbricas. A pesar de usar los parámetros propuestos por [12] para la función de costes, se han realizado modificaciones en la implementación al variar la tecnología sobre la cual el protocolo ha sido implementado. Por ejemplo, en el caso de la energía, en la función de costes presentada en [12], debido a la implementación de un mecanismo de control de potencia, la función de costes trata de minimizar el coste energético a través de la reducción de la potencia de transmisión. La implementación presentada en este artículo, al no considerar mecanismos de control de potencia, considera el factor energético intentando maximizar el tiempo de vida de las baterías.

La función de costes definida en [12] permite crear caminos entre *S* y *D* caracterizando cada uno de los enlaces que posee un nodo, y asignándoles un coste. De este modo, en la construcción de la ruta se busca el camino de mínimo coste. Existen numerosos parámetros a considerar en la función de costes, pero ha de tenerse en cuenta el compromiso entre los beneficios de una compleja función de costes y el propio coste computacional que ello conlleva. La función de costes definida en [12] e implementada en el presente trabajo para fines comparativos está modelada por la siguiente ecuación:

$$\text{cost} = \alpha_1 \cdot 1 + \alpha_2 \cdot \text{load} + \alpha_3 \cdot \text{energy} \quad (1)$$

La ecuación (1) es calculada por cada uno de los nodos al recibir el *RREQ*. El valor de *cost* representa el coste del enlace entre el nodo que envía y el que recibe el *RREQ*. En ella, “1” hace referencia al número de saltos, *load* representa la congestión del canal y *energy* denota la energía consumida por el nodo. A continuación se realiza una explicación más detallada de cada uno de los parámetros y del modo en el que son calculados.

- “1”: Representa el salto necesario para llegar desde el nodo que envía el *RREQ* hasta el nodo que lo recibe.
- *load*: Para realizar la medida de la congestión del canal se utiliza el envío periódico de los mensajes de beacon. Puesto que el intervalo entre mensajes de beacon es conocido, es posible determinar el retraso sufrido por el mensaje. Este retraso es causa, principalmente, de la contienda por el canal y/o de una acumulación en el buffer de envío de paquetes. La ecuación (2) muestra como es calculado el intervalo entre los mensajes de beacon. En (2), *NOW* representa el instante actual, T_{last_beacon} el instante en el que se recibió el último mensaje de beacon, y T_{beacon} el periodo de beacon. La ecuación (3) pretende que la medida de la congestión del canal sea consecuente con el historial del enlace. El parámetro β permite dar mayor o menor importancia al último valor del intervalo de beacon calculado.

$$intvl = \frac{NOW - T_{last_beacon} - T_{beacon}}{T_{beacon}}; 0 \leq intvl \leq 1 \quad (2)$$

$$load = (1 - \beta) \cdot load_{old} + \beta \cdot intvl \quad (3)$$

- *energy*: El parámetro *energy* representa la energía consumida por un nodo. Este parámetro es incorporado en la función de costes con la finalidad de maximizar el tiempo de vida de las baterías. Como puede verse en la ecuación (4), el valor de *energy* es calculado mediante la resta de la energía inicial (E_{init}) y la energía actual (E_{now}).

$$energy = E_{init} - E_{now} \quad (4)$$

Como puede apreciarse en la ecuación (1), tanto el número de saltos, como la congestión del canal y la energía están ponderados por unas constantes α_i . Con el fin de que cada uno de los parámetros tenga igual influencia dentro de la función de costes, los valores de α_i han de ser los siguientes:

$$(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = (1, 1, \frac{1}{E_{init}}) \quad (5)$$

Para medir la influencia de la direccionalidad hacia el destino en algoritmos de enrutamiento ad-hoc han sido implementadas diferentes versiones del algoritmo de selección de ruta. Los algoritmos propuestos utilizan la función de costes presentada en esta sección para escoger la ruta de mínimo coste entre todas las rutas que alcancen al destino.

C. Consideración de la direccionalidad en los protocolos de enrutamiento para redes MCN-MR

Las redes MCN-MR llevan a cabo la comunicación entre un terminal móvil y una estación base empleando nodos retransmisores móviles. En el caso del enlace ascendente o *uplink*, en el que se centra la presente investigación, es factible considerar, incluso actualmente, que el terminal móvil origen pudiera conocer la ubicación fija de la estación base destino de los datos; la ubicación de las estaciones base de telefonía móvil en España está actualmente disponible al público en la web del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (www.mityc.es). En el caso del tráfico descendente o *downlink*, la posición del terminal móvil destino de la información podría estar disponible de forma precisa a través del sistema GPS o Galileo, aunque también podría estimarse de forma más o menos precisa a través de técnicas de localización geométrica en redes de telefonía móvil. En este contexto, el presente artículo propone la consideración de la direccionalidad desde el nodo fuente de la información hasta el nodo destino con el fin de mejorar el enrutamiento en redes inalámbricas multi-hop, sobre todo reduciendo la señalización, congestión y consumo energético que caracterizan a la mayoría de protocolos de enrutamiento multi-hop disponibles en la actualidad.

IV. PLATAFORMA DE SIMULACIÓN

El presente estudio ha sido desarrollado empleando la plataforma de simulación ns2 (*Network Simulator v.2*) [13] con el fin de modelar la comunicación entre los distintos nodos del sistema. ns2 es un simulador de eventos discretos y de código abierto ampliamente utilizado en la investigación de redes de comunicación tanto cableadas como inalámbricas. El alto grado de aceptación que posee ns2 en distintos ámbitos de investigación, incluido el estudio de redes *ad-hoc* de comunicaciones, permitirá contrastar, comparar y verificar los resultados obtenidos.

Las características del escenario de simulación en el que será evaluado el rendimiento de los algoritmos propuestos en este artículo vienen resumidas en la Tabla 1. Sobre un escenario tipo Manhattan de dimensiones 2250m x 2250m, diferentes densidades de nodos se desplazan siguiendo un modelo de movilidad *Random Walk Obstacle* [14]. Dicho modelo de movilidad establece inicialmente una posición aleatoria de los nodos. Cuando da comienzo la simulación, los nodos se desplazan con una velocidad constante hasta alcanzar una intersección. La probabilidad de cambiar de dirección en la intersección es del 25%, es decir, el nodo puede girar a la derecha, girar a la izquierda, seguir recto o retroceder con la misma probabilidad. Para dar mayor realismo al escenario de simulación, existen dos vías principales que se cruzan en el centro del escenario, donde está situada la BS. La Figura 3 ofrece una visión del entorno de simulación para una densidad de 500 nodos. La anchura de los edificios es de 225 m y la de las calles de 25 m.

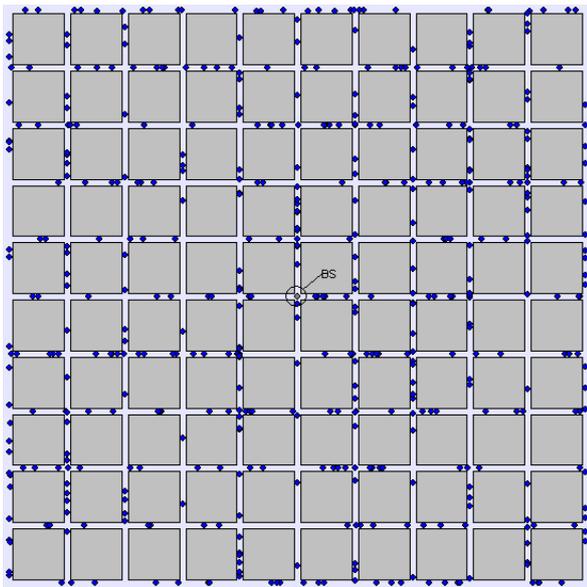


Figura 3. Escenario de simulación

La tecnología de acceso radio empleada por los nodos es 802.11a, la cual trabaja en la banda de frecuencias de 5.8GHz. El modelo de propagación considerado para modelar las pérdidas que sufre la señal radio al propagarse entre transmisor y receptor es un modelo determinista que considera el efecto del *pathloss*, diferenciando la atenuación de la señal en base a la distancia entre nodos de comunicación, y la existencia o no de condiciones de visión directa (LOS - Line-of-Sight) y NLOS (Non Line-of-Sight). En un entorno urbano, como el simulado en el presente trabajo, la visibilidad entre dos nodos depende en gran medida de la presencia de edificios obstructores (Figura 4). Las ecuaciones que modelan las pérdidas de propagación han sido extraídas del modelo urbano micro-celular desarrollado en el proyecto europeo WINNER [15].

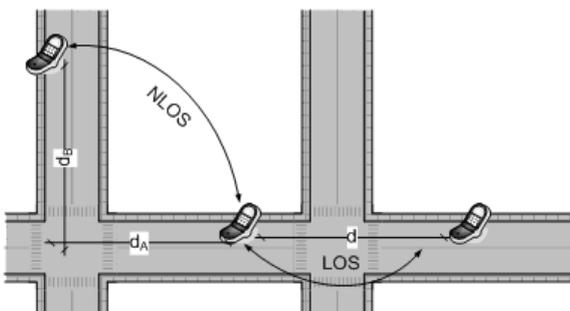


Figura 4. Condiciones de propagación en entornos urbanos

El tráfico modelado para medir las prestaciones de los algoritmos se muestra esquematizado en la Figura 5, y sigue los patrones de tráfico a ráfagas actualmente experimentados en la transmisión de datos. Es importante destacar que el modelo empleado no pretende reproducir de forma exacta un cierto tipo de tráfico, sino modelar las intermitencias características en las transmisiones de datos y sesiones de

Internet. En el modelo implementado, durante sesiones de 200 segundos se lleva a cabo un tráfico intermitente compuesto por periodos de actividad (*ON*) de duración 5 segundos y periodos de inactividad (*OFF*) de 15 segundos. Durante los periodos de *ON* son enviados en dirección a la BS un total de 50 paquetes, es decir, 10 paquetes/segundo. El periodo de inactividad de 15 segundos provoca la destrucción de las tablas de rutas de los nodos por expiración de la validez y por tanto, la necesidad de una nueva búsqueda de ruta en el siguiente periodo de *ON*.

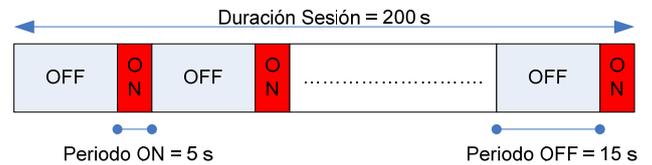


Figura 5. Modelo de tráfico ON-OFF

TABLA 1

PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN PARA LA SIMULACIÓN

Parámetro	Valor
Numero de nodos	500
Potencia de Transmisión (W)	0.2
Tipo de escenario	Manhattan o cuadrícula
Distribución de los nodos no uniforme	Doble vía en avenidas centrales
Dimensiones del escenario (m x m)	2250 x 2250
Anchura de los edificios (m)	225
Anchura de calle (m)	25
Velocidad (Distribución normal (media, var)) (m/s)	$N(1.5, 0.1^2)$
Modelo de movilidad	Random Walk Obstacle
Tecnología de acceso radio	802.11a
Tasa de transmisión (Mbps)	12
Protocolo de enrutamiento	AODV modificado
Periodo de Beacon (s)	5
Tiempo de simulación (s)	10000
Numero de nodos fuente	50
Duración de la sesión de tráfico (s)	200
Duración periodo ON (s)	5
Tasa de envío en ON (pkt/seg)	10
Tamaño de paquete (bytes)	500
Duración periodo OFF (s)	15
Modelo de propagación	Pathloss LOS NLOS

V. RENDIMIENTO DE PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO MULTI-HOP EN REDES MCN-MR

Con el fin de analizar el efecto que la consideración de la direccionalidad tiene en el funcionamiento y rendimiento de los protocolos de enrutamiento multi-hop en las redes MCN-MR, la presente sección estudia en primer lugar la técnica Multi Métricas (MM) definida en [12]. Esta técnica ha sido escogida como algoritmo con el que comparar las propuestas del presente artículo debido a su alto rendimiento en redes inalámbricas multi-hop. A continuación, se presentarán y analizarán las distintas propuestas del presente artículo que incorporan la direccionalidad con el fin de optimizar el rendimiento de los protocolos de enrutamiento reduciendo su señalización y consumo energético.

A. Multi Métricas (MM)

La función de costes definida en [12] y presentada en la sección III considera el número de saltos, la congestión del canal y la energía consumida para identificar la ruta óptima entre origen y destino. En el presente artículo, el rendimiento de MM es evaluado considerando la modificación de AODV establecida por el estándar 802.11s, combinación referida en [12] como MMRP-I pero que por sencillez va a referirse en el presente artículo como MM.

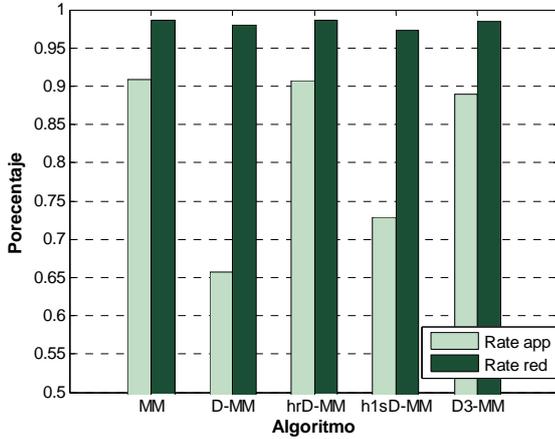


Figura 6. Tasa de paquetes entregados al destino respecto a los generados por la aplicación y a los enrutados.

Como puede apreciarse en la Figura 6, la técnica MM consigue altas tasas de paquetes entregados al destino con respecto a los generados por la aplicación (rate_app), y de paquetes entregados al destino en relación al número de paquetes enrutados (rate_red). El alto rendimiento de MM es debido a su función de costes y al protocolo de enrutamiento emulado, el cual realiza búsqueda de rutas en todas las direcciones, siendo finalmente escogida la ruta de mínimo coste. Si bien, este procedimiento de búsqueda de rutas resulta en una alta eficiencia en el enrutamiento de paquetes en redes inalámbricas multi-hop, también genera una elevada señalización (Figura 7) que puede resultar en una alta congestión del canal radio. Esta congestión viene reflejada por el número de paquetes de búsqueda de ruta que han sido retransmitidos por nodos intermedios en cada intento de búsqueda de ruta ($RREQ$ retransmitidos / $RREQ$). El hecho de que la búsqueda de las rutas se realice en todas direcciones y que los nodos intermedios sean capaces de reenviar un mismo RREQ si posee un coste acumulativo menor era necesario para garantizar un alto rendimiento, pero es también el causante de la elevada congestión.

B. Direccionalidad-Multi Métricas

Con el fin de reducir la señalización y congestión resultante del protocolo de enrutamiento establecido por el estándar 802.11s junto a la función de costes MM, los autores del presente artículo proponen la consideración de la direccionalidad en el proceso de enrutamiento a través del protocolo Direccionalidad-Multi Métricas (D-MM), el cual explota el conocimiento de la ubicación de la BS en su

proceso de búsqueda de ruta. A diferencia del protocolo MM, D-MM no permite que nodos intermedios que estén más alejados del destino que lo estaba el nodo anterior retransmitan los mensajes de búsqueda de ruta; de este modo, todos los saltos suponen una progresión hacia la BS. En el proceso de búsqueda de ruta, el paquete $RREQ$ es descartado si, tras ejecutarse el algoritmo que calcula la directividad hacia el destino, se comprueba que el nodo que recibe el $RREQ$ está más alejado del nodo destino D que lo estaba el nodo que envió el $RREQ$. De entre las rutas que vayan dirigidas hacia D , D-MM escoge aquella que minimiza la función de costes definida por MM.

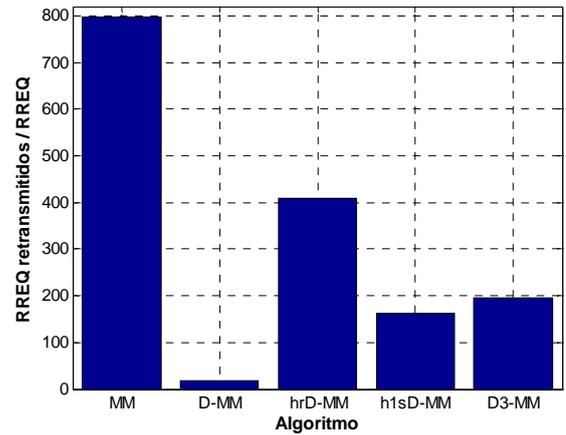


Figura 7. Numero de paquetes de RREQ reenviado por los nodos intermedios por intento de búsqueda de ruta

TABLA 2

NÚMERO DE SALTOS Y DISTANCIA RECORRIDA EN LAS RUTAS CREADAS

Algoritmo	MM	D-MM	hrD-MM	h1sD-MM	D3-MM
Saltos	7.157	5.632	7.109	6.349	7.075
Distancia de ruta (m)	1191.9	980.79	1192.8	1075.1	1178.2

Como puede observarse en la Figura 7, el protocolo D-MM consigue reducir de forma muy notable la señalización y congestión generada por el protocolo de enrutamiento multi-hop; la reducción de la señalización comparada con el algoritmo MM es del 97%. Sin embargo, la ‘radicalidad’ en la consideración de la direccionalidad por el protocolo D-MM resulta en una importante reducción de la tasa de paquetes entregados al destino. Dicha reducción es debida a la imposibilidad de creación de ruta por parte de D-MM; el 95% de los paquetes que no han sido entregados al destino no han conseguido salir del nodo origen S , es decir, no ha sido posible establecer una ruta y el propio nodo S los ha descartado. Por el contrario, una vez establecida una ruta, el protocolo D-MM obtiene una alta tasa de paquetes entregados con respecto a los enrutados. En este caso, el protocolo D-MM incrementa con respecto a MM (18%) el throughput medido a nivel de aplicación (Figura 8). Dicha diferencia se explica por el hecho de que la consideración de la direccionalidad en D-MM reduce el número de saltos y la distancia recorrida entre origen y destino (Tabla 2) con respecto al protocolo MM. Con el fin de reducir las desventajas que caracterizan el

rendimiento de D-MM, los autores proponen otros protocolos que intentan mantener el rendimiento de MM reduciendo su coste de señalización al nivel de D-MM al incorporar también la direccionalidad en el proceso de establecimiento de ruta.

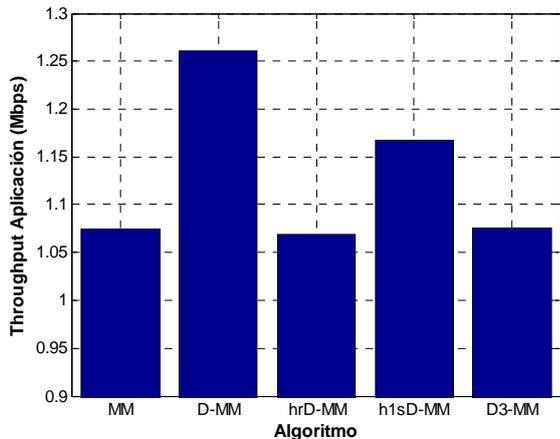


Figura 8. Throughput a nivel de aplicación

C. Híbrido ruta Direccionalidad-Multi Métricas

La propuesta de protocolo híbrido ruta Directividad-Multi Métricas (hrD-MM) es un punto intermedio entre las versiones MM y D-MM en el proceso de búsqueda de ruta. Aprovechando que el algoritmo de enrutamiento realiza varios intentos de búsqueda de ruta si transcurrido un tiempo no recibe respuesta (*RREP*) del nodo destino *D*, el algoritmo hrD-MM realiza un primer intento de búsqueda de ruta con la versión D-MM, y si no consigue establecer una ruta los sucesivos intentos son realizados con la versión MM para intentar maximizar la probabilidad de establecimiento de ruta entre los nodos fuente y destino. Cuando el nodo *S* inicia el proceso de búsqueda de ruta, un temporizador limita el tiempo permitido al paquete *RREQ* para encontrar una respuesta del nodo *D*. Durante este periodo permitido de búsqueda, ningún otro paquete *RREQ* es enviado por la estación *S*. Si transcurrido este periodo el nodo *S* no ha recibido el paquete *RREP* de *D*, el protocolo de enrutamiento entiende que el proceso de búsqueda de ruta ha sido fallido, e inicia de nuevo el proceso con un nuevo *RREQ* y el procedimiento establecido por MM. En consecuencia, hrD-MM es una solución híbrida entre D-MM y MM que intenta en primer lugar ofrecer el rendimiento de D-MM, y si no lo consigue opera según el protocolo MM. La Figura 6 muestra que hrD-MM cumple con su primer objetivo en cuanto a tasa de paquetes entregados, aunque de nuevo reduciendo el throughput de aplicación (Figura 8). Por el contrario, hrD-MM, si bien no consigue reducir los niveles de señalización al nivel de D-MM, sí que consigue una reducción muy notable (48%) con respecto al protocolo MM. Como puede observarse en la Tabla 3, el protocolo hrD-MM también consigue un menor porcentaje de rutas que se rompen del total de rutas creadas, y una mayor duración de las rutas que se rompen con respecto a MM.

TABLA 3

PORCENTAJE DE RUTAS ROTAS DEL TOTAL DE RUTAS CREADAS Y DURACIÓN DE LAS RUTAS

Algoritmo	MM	D-MM	hrD-MM	h1sD-MM	D3-MM
Rutas rotas (%)	32.4	25.5	28.8	31.8	31.2
Duración (s)	1.581	1.804	1.718	1.696	1.6841

D. Híbrido 1-salto Direccionalidad-Multi Métricas

La siguiente propuesta de los autores, el protocolo híbrido 1-salto Direccionalidad-Multi Métricas (h1sD-MM), busca un nuevo compromiso, reducir el nivel de congestión e incrementar el throughput de aplicación conseguidos por el algoritmo hrD-MM. Para ello, h1sD-MM acota la región de búsqueda de ruta, pues únicamente aquellos nodos intermedios que están situados a una distancia inferior a la que se encuentra el nodo *S* de la BS tienen permiso para retransmitir el *RREQ*. Para ello, el nodo *S* introduce en el paquete *RREQ* la distancia a la que se encuentra de BS cuando inicia el proceso de búsqueda de ruta. Los nodos intermedios comprueban este campo al recibir el mensaje *RREQ*, y tan solo si su distancia es inferior a la que marca el paquete colaboran en la búsqueda de la ruta. Este funcionamiento se corresponde con la utilización de D-MM para el primer salto del mensaje *RREQ*, y una versión acotada de MM para el resto de reenvíos.

Las Figuras 7 y 8 muestran que los objetivos perseguidos por h1sD-MM en relación a la congestión y al throughput de aplicación han sido conseguidos. h1sD-MM reduce en un 80% la congestión causada por MM, y en un 60 % la causada por hrD-MM. El throughput de aplicación ha conseguido incrementarse en un 8.5% respecto a MM y hrD-MM, aunque sigue siendo inferior a D-MM, lo que resulta en una reducción de la tasa de paquetes entregados (Figura 6). Los resultados mostrados en la Tabla 2 reflejan como h1sD-MM, debido a las restricciones que impone en el proceso de búsqueda de ruta, consigue construir las rutas con un menor número de saltos, consiguiendo pues reducir la distancia recorrida entre los nodos origen y destino.

E. Direccionalidad x-permisos Multi Métricas

Por último, los autores proponen un último protocolo Direccionalidad x-permisos Multi Métricas (Dx-MM) que trata de fructificar las sinergias de los algoritmos vistos anteriormente, considerando el compromiso existente entre los objetivos buscados. Dx-MM es una versión más 'permissiva' del algoritmo D-MM al considerar la direccionalidad en el proceso de búsqueda de ruta entre los nodos fuente y destino. Para ello, el paquete *RREQ* contiene un campo en el que se indica el número de saltos permitidos (x-permisos) en dirección contraria al nodo destino *D*. Con el protocolo Dx-MM, el paquete *RREQ* se propagará por la red a medida que las rutas vayan dirigidas hacia el nodo *D*, o no hayan sido sobrepasados el número de permisos establecidos por el nodo *S*. Los resultados mostrados para el protocolo D3-MM en las figuras 6 y 8 muestran como D3-MM consigue una tasa de paquetes entregados similar al protocolo MM con un throughput de aplicación ligeramente superior. Además, el

protocolo D3-MM consigue reducir de forma muy notable, con respecto a MM, el nivel de señalización y congestión generados por el proceso de establecimiento de ruta multi-hop (Figura 7). Los resultados obtenidos han demostrado que la variación en el número de permisos ofrece un compromiso entre señalización/congestión y éxito en la tasa de entrega de paquetes al destino.

Por último, y con el fin de enfatizar el beneficio de considerar la direccionalidad en el proceso de enrutamiento multi-hop para redes MCN-MR, conviene analizar la energía consumida por parte de los nodos móviles al implementar los distintos protocolos analizados. Como ya fue destacado en la introducción, el consumo energético es un factor clave en la operatividad de las redes MCN-MR. La Figura 9 muestra el consumo energético generado por la señalización de la creación de rutas (denominada *Routing*) en comparación con el total de la energía consumida. Los resultados obtenidos muestran que en el caso del protocolo MM, la señalización necesaria para el proceso de enrutamiento supone un 55% del consumo total energético de los nodos. La figura 9 también muestra como las distintas propuestas presentadas en este artículo permiten reducir de forma significativa el consumo energético en el proceso de establecimiento de ruta, siendo interesante destacar al protocolo D3-MM, el cual a pesar de alcanzar el rendimiento MM consigue reducir notablemente el consumo energético. La Tabla 4 muestra la energía media consumida por los nodos y la homogeneidad en el consumo energético de los distintos nodos emulados (desviación típica). La tabla 4 muestra de nuevo que los algoritmos propuestos en este artículo realizan un consumo energético más eficiente que el algoritmo MM. Lo más destacable de la Tabla 4 es que la consideración de la direccionalidad en el proceso de enrutamiento no sólo puede reducir el consumo energético sino también hacerlo más homogéneo entre los nodos móviles.

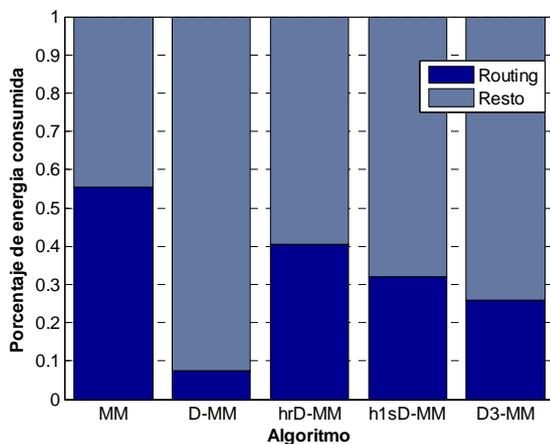


Figura 9. Porcentaje de energía consumida

TABLA 4

ENERGÍA MEDIA CONSUMIDA Y DESVIACIÓN TÍPICA

Algoritmo	MM	D-MM	hrD-MM	h1sD-MM	D3-MM
Energía consumida (J)	0.334	0.1456	0.2581	0.2051	0.2111
Desviación típica	0.0626	0.0474	0.06	0.0625	0.0753

VI. CONCLUSIÓN

En el presente artículo, los autores han propuesto una serie de algoritmos de enrutamiento, basados en la modificación de AODV establecida en el estándar 802.11s y la función de costes MM definida en [12], que aprovechan las características de las redes MCN-MR para conseguir altos rendimientos en el proceso de enrutamiento, reduciendo a su vez la señalización y consumo energético resultantes del proceso de enrutamiento. En concreto, los protocolos propuestos abogan por explotar la direccionalidad en las redes MCN-MR al poder conocer la ubicación del nodo destino en los enlaces inalámbricos multi-hop. Los resultados obtenidos han demostrado que los protocolos propuestos permiten establecer rutas fiables y eficientes que consiguen reducir notablemente el consumo energético.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación bajo el proyecto TEC2008-06728 y por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio bajo el proyecto TSI-020400-2008-113.

REFERENCIAS

- [1] International Telecommunication Union. [Online] .Sitio Web Oficial. <http://www.itu.int>.
- [2] Y. Lin y Y. Hsu, "Multihop Cellular: A New Architecture for Wireless Communications", en *IEEE Proceeding INFOCOM*, 2000.
- [3] R. Ananthapadmanabha, B.S. Manoj y C.S.R. Murthy, "Multi-hop Cellular Networks: The Architecture and Routing Protocols", en *IEEE Symposium PIMRC*, 2001.
- [4] C. Perkins y E. Royer, "Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing", en *IEEE Proceedings Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, 1999.
- [5] IEEE P802.11s/D2.0, draft amendment to standard IEEE 802.11: Mesh Networking. *IEEE Standard*, 2007.
- [6] C. E. Perkins y P. Bhagwat, "Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers", en *ACM Proceeding SIGCOMM'94: Computer Communications Review*, 1994.
- [7] S. Lee y D. Cho, "On-Demand Energy-Efficient Routing for Delay-Constrained Service in Power-Controlled Multihop Cellular Network", en *IEEE Proceedings VTC2004-Fall*, 2004.
- [8] T. Aure y F. Y. Li, "Load-balancing in Multi-homed OLSR Networks using Airtime Metric and Radio-aware Path Selection: Implementation and Testing" white paper, Universidad de Agder, 2008.
- [9] L. T. Nguyen y R. Beuran, "A load Aware Routing Metric for Wireless Mesh Networks", en *IEEE Symposium on Computers and Communications*, 2008.
- [10] T. Salonidis, M. Garetto, A. Saha y E. Knightly, "Identifying High Throughput Paths in 802.11 Mesh Networks: a Model-based Approach", en *IEEE International Conference ICNT*, 2007.
- [11] Y. Park y E. Jung, "Resource-Aware Routing Algorithms for Multihop Cellular Networks", en *IEEE International Conference MUE*, 2007.
- [12] L. Cao, K. Sharif, Y. Wang y T. Dahlberg, "Adaptive Multiple Metrics Routing Protocols for Heterogeneous Multi-Hop Wireless Network", en *IEEE Proceedings CCNC*, 2008
- [13] The Network Simulator – ns2. Sitio web oficial: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [14] K. Maeda, A. Uchiyama, T. Umedu, H. Yamaguchi, K. Yasumoto y T. Higashino, "Urban Pedestrian Mobility for Mobile Wireless Network Simulation", en *Elsevier Ad Hoc Networks*, 2009.
- [15] WINNER, "D1.1.1. WINNER II interim channel models", *Public Deliverable*, <https://www.ist-winner.org/index.html>