

# AQA-AODV: Protocolo de encaminamiento con QoS para redes inalámbricas ad hoc

*Autor:* Wilder Eduardo Castellanos Hernández

*Director:* Juan Carlos Guerri Cebollada

*Resumen* - Debido a las limitaciones de ancho de banda y a la topología dinámica de las redes móviles ad hoc, uno de los mayores desafíos es el desarrollo de mecanismos de calidad de servicio que permitan que comunicaciones sensibles al retardo (por ejemplo *videostreaming*), no se vean seriamente afectadas. En esta tesina se propone un protocolo de encaminamiento basado en AODV (AQA-AODV), el cual establece rutas de acuerdo a los requerimientos de la capa de aplicación y el estado de la red. El protocolo propuesto incorpora un esquema de realimentación que permite estimar el máximo ancho de banda que puede soportar una ruta de  $n$  saltos e informar al nodo fuente para que éste ajuste apropiadamente su tasa de transmisión. Este es un atributo deseable sobre todo en aplicaciones donde es posible adaptar algunos parámetros en la codificación de fuente para reducir la tasa de envío. Los resultados de las simulaciones muestran mejoras importantes en términos de pérdidas de paquetes y el retardo, mientras que el throughput no se ve afectado en comparación con el throughput alcanzado con otros protocolos como AODV.

*Abstract* - Due to bandwidth constraint and highly dynamic topology in ad hoc network systems, one of the major challenges is the deployment of end-to-end quality-of service support mechanisms. Time-sensitive communications like video applications may be seriously disrupted if this QoS support mechanisms don't exist. In this dissertation we propose a QoS routing protocol based on AODV (AQA-AODV), which creates routes according to application QoS requirements. We have introduced link and path available bandwidth estimation mechanisms and an adaptive scheme that can provide feedback to the source node about the current network state, to allow the application to appropriately adjust the transmission rate. The simulation results reveal the performance improvements in terms of packet loss and delay while the end-to-end throughput is not affected compared with throughput achieved by other protocols like AODV.

Autor: Castellanos Hernández, Wilder E.: email: [wilcashe@posgrado.upv.es](mailto:wilcashe@posgrado.upv.es)

Director: Guerri Cebollada, Juan Carlos: email: [jcguerri@dc.com.upv.es](mailto:jcguerri@dc.com.upv.es)

Fecha de entrega: 11-09-09

## ÍNDICE

<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>II. CAPACIDAD DE LOS ENLACES EN LAS REDES INALÁMBRICAS AD HOC.....</b>	<b>5</b>
II.1. MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL ANCHO DE BANDA DISPONIBLE.....	7
II.1.1 Método 1.....	8
II.1.2 Método 2.....	9
II.1.3 Método 3.....	10
II.1.4 Método 4.....	11
II.1.5 Método 5.....	11
II.2. PREDICCIÓN DEL ANCHO DE BANDA CONSUMIDO EN UNA RUTA.....	12
II.2.1 Método 1.....	13
II.2.2 Método 2.....	13
<b>III. PROTOCOLOS DE ENCAMINAMIENTO CON CALIDAD DE SERVICIO EN REDES MÓVILES AD HOC.....</b>	<b>14</b>
III.1. PROTOCOLO DE ENCAMINAMIENTO AODV.....	15
III.2. ESQUEMAS DE ENCAMINAMIENTO CON CALIDAD DE SERVICIO EN REDES MÓVILES AD HOC.....	17
III.2.1 Q-AODV, Calidad de servicio para AODV.....	20
<b>IV. AQA-AODV: PROTOCOLO DE ENCAMINAMIENTO CON CALIDAD DE SERVICIO CON ESQUEMA DE REALIMENTACIÓN BASADO EN AODV.....</b>	<b>22</b>
IV.1. ESTABLECIMIENTO DE RUTAS.....	22
IV.2. ESTIMACIÓN DEL ANCHO DE BANDA DISPONIBLE.....	24
IV.3. PREDICCIÓN DEL ANCHO DE BANDA CONSUMIDO POR UNA RUTA.....	25
IV.4. MECANISMO ADAPTATIVO DE RECUPERACIÓN DE RUTAS.....	27
IV.5. RESUMEN DE LAS PRINCIPALES MODIFICACIONES.....	29
IV.6. DIFERENCIAS ENTRE LOS PROTOCOLOS AQA-AODV Y QAODV.....	30
<b>V. SIMULACIÓN Y RESULTADOS.....</b>	<b>31</b>
V.1. ENTORNO DE SIMULACIÓN.....	31
V.1.1 Escenarios de simulación.....	31
V.2. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES.....	31
V.2.1 Topología lineal de 7 nodos estáticos.....	32
V.2.2 Topología lineal estática de longitud variable.....	34
V.2.3 Topología móvil.....	35
<b>VI. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....</b>	<b>36</b>
VI.1. CONCLUSIONES.....	36
VI.2. LÍNEAS FUTURAS.....	37
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>38</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>40</b>

## I. INTRODUCCIÓN

Una red móvil ad hoc (MANET, *Mobile Ad-Hoc Network*) es un conjunto de nodos inalámbricos autónomos que mantienen comunicación entre sí de manera directa y con administración descentralizada. Todos los nodos en una red ad hoc, realizan tareas de encaminamiento, procesamiento de datos y mantenimiento de rutas. Además, los nodos se acercan o se alejan del área de cobertura, de manera que las rutas de interconexión cambian dinámicamente y por tanto su topología. Por lo general las MANETs tienen dos tipos de limitaciones: unas propias de los nodos (limitaciones de capacidad de almacenamiento y energía) y otras propias del medio inalámbrico ya que el radio de transmisión es limitado y el ancho de banda reducido a causa del acceso múltiple. También se presentan otros inconvenientes como el desvanecimiento, problemas de *overhead*, ruido e interferencia, así como seguridad restringida. En este tipo de redes, se tiene un encaminamiento *multi-salto*, donde los nodos se utilizan a sí mismos y a otros nodos como encaminadores para que los paquetes lleguen a su destino, es decir, el encaminamiento origen – destino se realiza mediante múltiples saltos entre los nodos intermedios. Sin embargo, a pesar de las limitaciones, las redes ad hoc han despertado especial interés debido a la posibilidad de ser desplegadas con facilidad en sitios donde no existe infraestructura de comunicaciones o que en su defecto haya sido destruida previamente y además permiten una constante movilidad. Esto ha abierto las puertas a una amplia gama de aplicaciones y servicios en diferentes escenarios, tanto civiles como militares, demandando a su vez la transmisión de aplicaciones con mayores requerimientos de calidad de servicio (QoS), tal como las aplicaciones de *videostreaming*. Sin embargo, ofrecer transmisiones de vídeo en tiempo real sobre redes móviles ad hoc, garantizando una cierta calidad de servicio, no es una tarea fácil, no solo por las limitaciones que supone compartir el canal inalámbrico, sino también por los continuos cambios en la topología de red a causa de la movilidad de los nodos y al constante establecimiento y ruptura de enlaces. Es por esto que en los últimos años se han centrado esfuerzos en diseñar algunos mecanismos para gestión y asignación de recursos a nivel de capa MAC (por ejemplo, el estándar IEEE 802.11e) y en el desarrollo de nuevos esquemas de señalización de QoS como INSIGNIA [1] y SWAN [2]. Sin embargo, separar el encaminamiento de la gestión de calidad de servicio, puede provocar la selección de rutas ineficientes y por lo tanto reducir la probabilidad de cumplir con los requerimientos de QoS de las comunicaciones que se cursan por la red. A nivel de capa de red, algunas soluciones proponen adicionar a los protocolos de encaminamiento ya existentes, algoritmos para el cálculo de las métricas de QoS y mecanismos de selección de rutas basados en los requerimientos de las aplicaciones. Tal es el caso de Q-AODV [3] y Q-OLSR [4], dos esquemas de encaminamiento para MANETs que proveen a los protocolos AODV (*Ad-hoc On-demand Distance Vector*) [5] y OLSR (*Optimized Link State Routing*) [6] respectivamente, de funciones para gestionar la QoS durante el establecimiento y el mantenimiento de las rutas.

En esta tesina se propone un protocolo de encaminamiento con calidad de servicio que permite a la fuente de tráfico adaptar su tasa de transmisión. El protocolo desarrollado se ha denominado AQA-AODV (*Adaptive QoS-Aware AODV*), el cual es una versión modificada del protocolo AODV. Específicamente, se ha adicionado al protocolo AODV original, un mecanismo que permite la estimación del ancho de banda disponible en los nodos, un algoritmo para la estimación del ancho de banda consumido a lo largo de la ruta de n-saltos y un procedimiento de realimentación que permite informar a la fuente sobre el estado de la red. La métrica utilizada en el protocolo de encaminamiento para el establecimiento de rutas, es el ancho de banda, ya que la utilización de múltiples métricas, es considerada como un problema de tipo NP-completo [7].

Para evaluar el desempeño de AQA-AODV se ha desarrollado una implementación de dicho protocolo sobre el simulador NS-2. Los resultados indican que las pérdidas de paquetes y el retardo extremo a extremo, disminuyen significativamente, mientras el máximo throughput a lo largo de ruta no se ve afectado, en comparación con otros protocolos de encaminamiento que no proveen calidad de servicio.

Este documento está organizado de la siguiente manera: en la sección II se describe el impacto del reenvío de paquetes por los nodos a lo largo de una ruta, sobre el retardo, las pérdidas de paquetes y la capacidad de los enlaces en las redes inalámbricas ad hoc. Además se hace una descripción de los principales métodos utilizados en la estimación del ancho de banda y en la predicción de las interferencias entre paquetes de un mismo flujo, a lo largo de una ruta de n saltos. En la sección III se describen los principales protocolos de encaminamiento, se resumen las principales características de algunas propuestas de encaminamiento con calidad de servicio en redes ad hoc y se profundiza en el esquema de QoS para AODV. En la sección IV se explica el funcionamiento y los principales mecanismos implementados en AQA-AODV. La sección V contiene la definición de los escenarios de simulación y los resultados de las simulaciones. Finalmente, en la sección VI se plantean algunas conclusiones y las líneas de trabajo futuras.

## II. CAPACIDAD DE LOS ENLACES EN LAS REDES INALÁMBRICAS AD HOC

Una de las limitaciones de las redes inalámbricas ad hoc es la capacidad de los enlaces debido a que los nodos no pueden acceder simultáneamente al medio. Concretamente, cuando un nodo está transmitiendo un paquete, sus nodos vecinos dentro de su rango de interferencia (IR, *Interference Range*) deben permanecer en silencio, degradando de esta manera, la máxima tasa a la que puede transmitir. Además, cuando una transmisión es establecida, los nodos deben cooperar en el reenvío de los paquetes a través de la red, lo cual significa que el throughput disponible en cada nodo se ve limitado, no solo por el acceso al canal, sino también por la carga producida por los paquetes a reenviar.

En esta sección se estudia la capacidad de transmisión que alcanza una red con nodos estáticos en una topología lineal, donde la fuente de tráfico es el primer nodo, el destino es el último nodo y los paquetes son reenviados a través de los nodos intermedios. En este escenario solamente los nodos adyacentes, están dentro del rango de transmisión de sus nodos vecinos. Los resultados de las simulaciones se muestran en la Fig. 1 y los parámetros de simulación usados en NS-2 son: modelo de radio propagación Two Ray Ground, CSMA/CA con el mecanismo RTS/CTS (IEEE 802.11) en capa MAC, capacidad de los enlaces de 2 Mbps, tipo de cola Drop Tail (máxima longitud de cola de 50), rango de transmisión de 250 metros y rango de interferencia de 550 metros y la fuente de tráfico envía paquetes tan rápido como su capa MAC se lo permite.

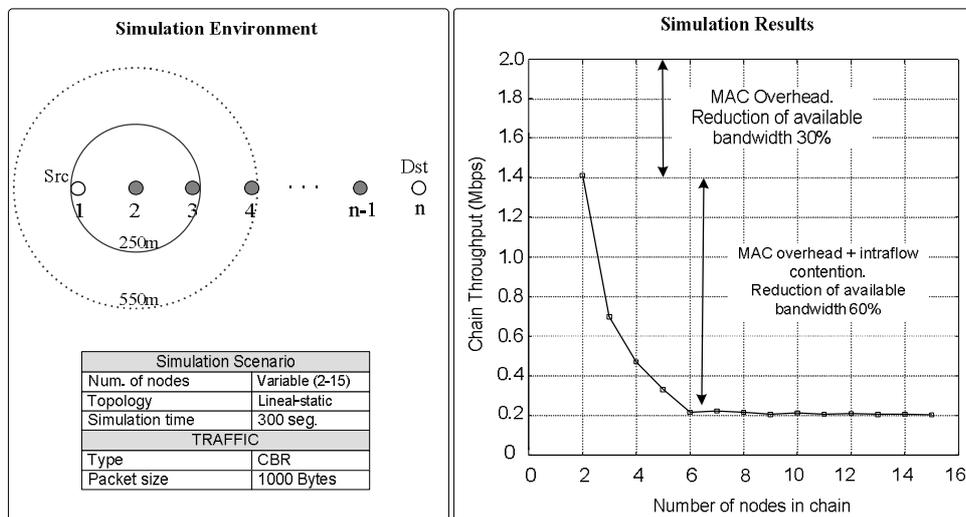


Fig. 1. Relación entre el máximo throughput y el número de nodos a lo largo de una topología de red lineal.

La Fig. 1 muestra la relación que existe entre el máximo throughput y el número de nodos en una red con topología lineal. Los resultados indican que la capacidad del enlace a lo largo de la cadena de nodos puede ser sorprendentemente baja. Se puede observar en la Fig. 1, que cuando se tiene una cadena de 2 nodos (es decir, la fuente comparte el canal con un nodo solamente), el throughput podría llegar hasta 1.4 Mbps (para paquetes de 1000 bytes) debido a la sobrecarga

producida por los paquetes RTS, CTS y ACK. Cuando el número de nodos en la topología se incrementa, el máximo throughput se reduce sustancialmente y cae hasta 0.2 Mbps, debido a la sobrecarga producida por el protocolo de capa MAC y la mutua interferencia entre los paquetes del mismo flujo, también llamada “contienda intraflujo” [7]. Un estudio más detallado puede ser consultado en [8].

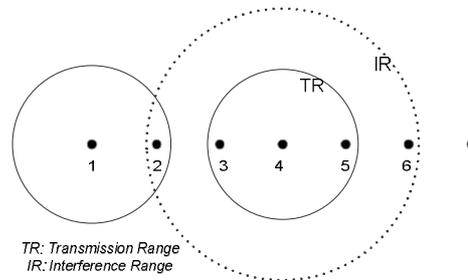


Fig. 2. Topología lineal de 7 nodos estáticos

Debido a la mala planificación que hace el estándar 802.11 para conceder el acceso al canal a los diferentes nodos de una red ad hoc, otros parámetros además del throughput, como las pérdidas y el retardo, también se ven afectados. Por ejemplo el nodo 3, en la topología mostrada en la Fig. 2, experimenta interferencias de otros 5 nodos, mientras el nodo 1 se ve afectado solamente por 3 nodos. Esto le permite al nodo 1 enviar paquetes a una tasa mayor que la capacidad de reenvío de los nodos sucesivos. Este hecho causa un incremento en los paquetes perdidos en los nodos 1, 2 y 3, tal y como se muestra en la Tabla 1. Por ejemplo, para una tasa de transmisión de 0.3 Mbps casi el 67% del total de los paquetes perdidos fueron eliminados en los nodos 1 y 2. De la misma manera, las pérdidas de paquetes se incrementan significativamente cuando el throughput máximo que puede alcanzar una cadena de 7 nodos (aproximadamente 0.2 Mbps) es superado ligeramente. La Fig. 3 muestra el incremento del retardo medio extremo a extremo y las pérdidas de paquetes a medida que la fuente incrementa su tasa de transmisión.

Tasa de transmisión, nodo fuente (Mbps)	Nodo						
	1	2	3	4	5	6	7
0.15	0	0	0	0	0	0	0
0.20	0	0	0	0	0	0	0
0.25	0	50	50	0	0	0	0
0.30	44.5	23.4	30.7	1.5	0	0	0
0.50	38.2	34.9	26.9	0	0	0	0
1.00	78.5	13.5	8.0	0	0	0	0

Tabla 1. Porcentaje de paquetes perdidos por nodo como función de la tasa de transmisión de la fuente

Además de esta situación, en la que algunos nodos pueden acceder al canal por más tiempo y por lo tanto inyectar paquetes a una tasa mayor que la soportada por toda la ruta, se suma el hecho de que el sistema de temporización para acceder al canal del protocolo 802.11, puede empeorar la función de reenvío en los nodos. Por ejemplo: cuando el nodo 4 está transmitiendo al 5 y el nodo 1 intenta

iniciar una transmisión a 2, el paquete RTS (*Request To Send*) del nodo 1, será eliminado debido a la interferencia que ejerce 4 sobre 2. Debido a esto, el nodo 2 no responde la solicitud del nodo 1 con un paquete CTS (*Clear To Send*). Así que el nodo 1 iniciará su temporizador (*backoff*) con un tiempo aleatorio, en espera de la disponibilidad del canal. De esta manera, mientras dura la transmisión del nodo 4, el nodo 1 fracasará en su intento por iniciar una transmisión, causando un dramático incremento de su ventana de contención, ya que en cada intento fallido el tiempo de espera es incrementado exponencialmente. Por lo tanto, cuando el nodo 4 termina su transmisión, es probable que el nodo 1 no utilice en canal para transmitir ya que continuará esperando un tiempo adicional hasta que termine su temporizador.

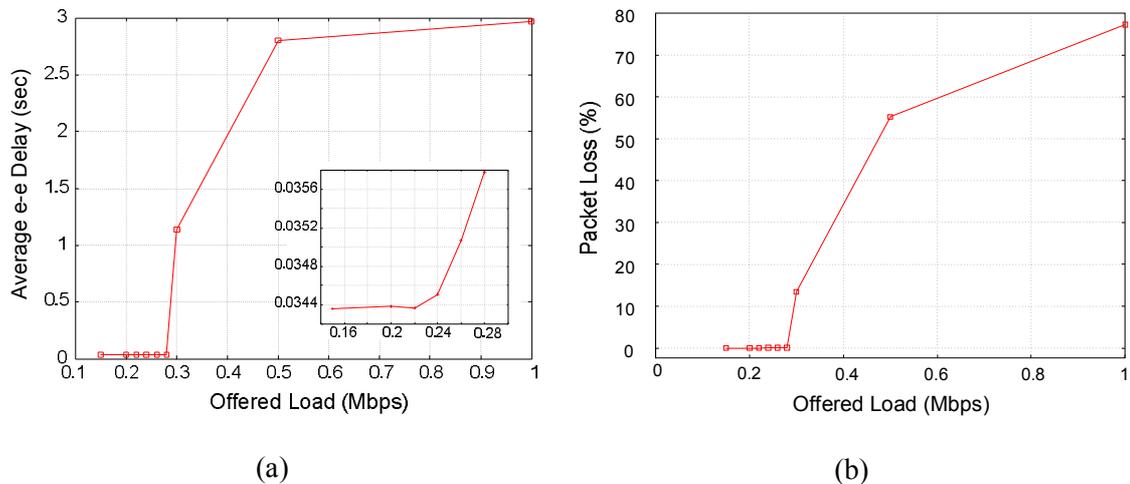


Fig. 3. (a) Retardo medio extreme-extremo y (b) pérdidas de paquetes en función de la tasa de transmisión del nodo fuente, sobre una red lineal de 7 nodos estáticos.

Estos primeros resultados corroboran que en las redes inalámbricas ad hoc se pueden presentar valores muy altos de retardo y de pérdidas de paquetes, dos parámetros muy importantes para la transmisión de vídeo. Esto sugiere que cualquier implementación o evaluación de aplicaciones sobre MANETs, requiere de un estudio previo de la capacidad de la red, en particular, cuando se tiene al estándar 802.11 como protocolo de capa MAC. La solución planteada en esta tesina consiste en un protocolo que tiene en cuenta el estado de los enlaces, en la selección de rutas con el fin de reducir la congestión en los nodos y por consiguiente el retardo medio y las pérdidas de paquetes.

## II.1. MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL ANCHO DE BANDA DISPONIBLE

Para predecir el ancho de banda disponible es necesario considerar 2 rangos: el rango de transmisión (TR, Transmission Range), que es la máxima separación entre un emisor y un receptor para la correcta recepción del paquete y el rango de interferencia (IR, Interference Range), que es la máxima distancia entre nodos y dentro del cual la tasa de envío de datos se comparte. Los nodos que están por fuera del rango de transmisión de un nodo, pero dentro de su rango de interferencia,

detectan el uso del canal pero no pueden decodificar satisfactoriamente los paquetes del nodo emisor. Tampoco pueden iniciar una transmisión cuando un nodo está transmitiendo, debido a la interferencia.

El ancho de banda disponible, es el ancho de banda que un nodo podrá calcular de acuerdo al número de vecinos dentro su rango de interferencia y se puede calcular como se muestra en la ecuación (1)

$$BW_{local} = BW_{total\ del\ canal} - \sum_i BW \quad (1)$$

*i*: número de nodos vecinos del nodo emisor dentro del rango de interferencia

*BW*: ancho de banda (Bandwidth)

### II.1.1 Método 1

El método planteado por Badis *et al.* en [9] se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Se calcula el factor de utilización del canal de acuerdo a la ecuación (2):

$$\mu = \frac{Idle\_Time\_In\_Window}{Window\_Duration} \quad (2)$$

$(1-\mu)$  es la proporción del tiempo que el nodo está libre.

Si se considera el método de detección de portadora virtual (el cual utiliza NAV, Network Allocation Vector), se deben satisfacer las siguientes condiciones para detectar cambios en el estado del canal. Para que la capa MAC detecte que el canal pasa de libre a ocupado debe ocurrir uno de los siguientes hechos:

- a. NAV (Network Allocation Vector) toma un nuevo valor.
- b. Estado de “recibiendo” cambia de libre a otro estado.
- c. Estado de “enviando” cambia de libre a otro estado.

La capa MAC detecta el canal como libre cuando todos los siguientes hechos ocurren:

- a. El valor de NAV es menor que el tiempo actual.
- b. Estado de “recibiendo” está libre
- c. Estado de “enviando” está libre

2. Cálculo del Throughput en el nodo:

Se calcula dividiendo el tamaño del paquete (en términos de bits) que va a ser enviado entre el tiempo utilizado para enviar dichos bits. Se tiene en cuenta no solamente el tiempo necesario para transmitir el paquete, además se incluye el tiempo para asegurar la correcta transmisión y recepción sin colisiones.

$$TH_{paq} = \frac{S}{t_q + (t_s + t_{CA} + t_{overhead}) * R + \sum_{r=1}^R B_T} \quad [bits/seg] \quad (3)$$

$t_{CA}$ : tiempo destinado a evitar colisiones (SIFS, DIFS)

$t_{overhead}$ : tiempo utilizado por RTS y CTS



éste sólo podrá conocer el ancho de banda utilizado dentro de su rango de transmisión, debido a que la cobertura de dichos mensajes es el rango de transmisión y no el de interferencia.

### II.1.3 Método 3

Este método, implementado por De Renesse en [11], se basa en el cálculo de los anchos de banda consumidos por los vecinos dentro del rango de interferencia de acuerdo a la ecuación :

$$BW_{consumido}(bps) = \frac{N \times S \times 8}{T} \quad (7)$$

Donde  $N$  es el número de paquetes enviados, recibidos o detectados durante una ventana de tiempo  $T$  y  $S$  el tamaño de dichos paquetes (en bytes). Debido a la complejidad de detectar el tamaño de los paquetes transmitidos o recibidos por los nodos vecinos, este es calculado de acuerdo al tiempo que dura la transmisión. Una vez calculado el ancho de banda consumido por los vecinos, el ancho de banda disponible se calculará mediante la ecuación (8).

$$BW_{disponible} = BW_{canal} - BW_{consumido} \quad (8)$$

En la Fig. 5 se ilustra un ejemplo de aplicación del método 3. Se asume que la capacidad del canal es de 2Mbps, los nodos B, C, D, E, F, I están dentro del rango de transmisión del nodo A y los nodos G, H, J, K están fuera del rango de transmisión pero dentro del rango de interferencia.

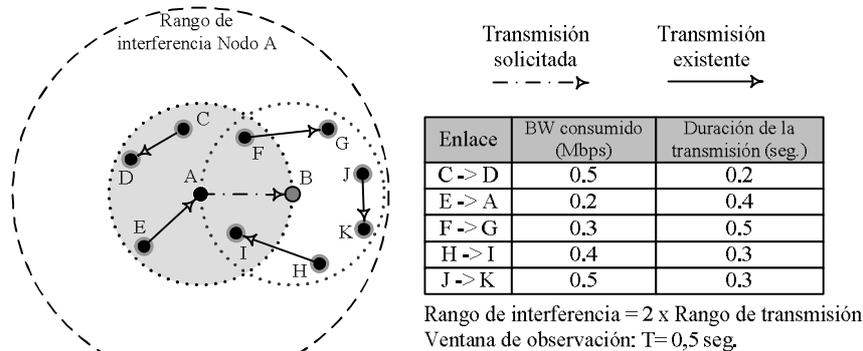


Fig. 5. Ejemplo de aplicación del método 3

$$BW_{cons.} = \frac{0.5Mbps \times 0.2s + 0.2Mbps \times 0.4s + 0.3Mbps \times 0.5s + 0.4Mbps \times 0.3s + 0.5Mbps \times 0.3s}{0.5s} = 1.2Mbps \quad (9)$$

$$BW_{disponible} = 2Mbps - 1.2Mbps = 0.8Mbps \quad (10)$$

Este método a diferencia del método 1, es independiente de la capa MAC y por lo tanto más fácil de implementar. Por lo tanto es necesario multiplicar por un factor (1,4 es utilizado en las simulaciones de la referencia [11]) para tener en consideración los paquetes RTS-CTS-ACK.

### II.1.4 Método 4

En los métodos anteriores, un nodo estimaba su ancho de banda disponible a partir del ancho de banda consumido por sus vecinos dentro de su rango de interferencia. Este método, también conocido como método Hello, a diferencia de los otros métodos, plantea estimar el ancho de banda residual, por medio del intercambio de mensajes *HELLO*. En protocolos de encaminamiento, como AODV, que ya tienen implementado este tipo de mensajes, la implementación es más sencilla y se evita crear nuevos mensajes de control.

Este método es el utilizado en AQA-AODV para estimar el ancho de banda en los nodos de una red inalámbrica ad hoc, por lo tanto, en la sección IV se describirán con mayor profundidad el funcionamiento y los detalles de su implementación en el simulador de redes NS-2.

### II.1.5 Método 5

No importa cuál de los métodos anteriormente expuesto se utilice, ninguno mide exactamente el ancho de banda disponible, ya que todos los métodos tienen en cuenta solamente el ancho de banda disponible en un nodo. El verdadero ancho de banda disponible debería ser el mínimo ancho de banda disponible para los vecinos dentro del rango de interferencia, para evitar que los flujos existentes se vean afectados. Para mayor claridad se propone el ejemplo que se muestra en la Fig. 6, donde se asume que el nodo A desea transmitir al nodo B a una tasa de 0,5 Mbps. Antes de enviar la petición de ruta al nodo B, el nodo A comprueba su ancho de banda disponible aplicando el método 3.

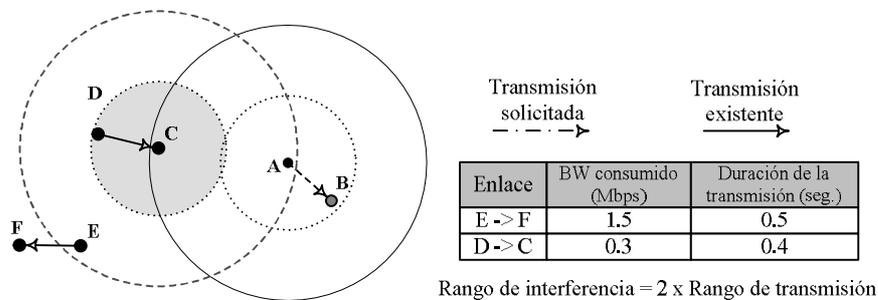


Fig. 6. Ejemplo de cálculo del ancho de banda disponible real

$$BW_{nodoA} = 2Mbps - \left( \frac{0,4}{0,5} * 0,3 \right) = 1,76Mbps \quad (11)$$

El resultado mostrado en (11), muestra que el nodo A tiene suficiente ancho de banda para establecer su comunicación hacia B. Esta transmisión entre A y B, será detectada por el nodo C, lo cual significa que este nodo también debe tener suficiente ancho de banda para soportar dicha transmisión.

$$BW_{nodoC} = 2Mbps - \left( \frac{0,4}{0,5} * 0,3 + \frac{0,5}{0,5} * 1,5 \right) = 0,26Mbps \quad (12)$$

El resultado de (12) muestra que el nodo C, no podría permitir un tráfico de 0,5 Mbps. En conclusión, cuando un nodo quiera conocer su ancho de banda disponible, debe tener en cuenta no solo su propia estimación del ancho de banda, sino también el mínimo ancho de banda disponible en sus vecinos dentro del rango de interferencia.

En el ejemplo de la Fig. 7 se muestra consta de una red inalámbrica ad hoc con 15 nodos y 7 transmisiones existentes. El nodo A pretende establecer una comunicación con el nodo B a una tasa de transmisión de 0,5 Mbps. A continuación se calculará el ancho de banda disponible en el nodo A, utilizando los métodos 2, 3 y la estimación exacta. Se asume un canal inalámbrico de 2 Mbps.

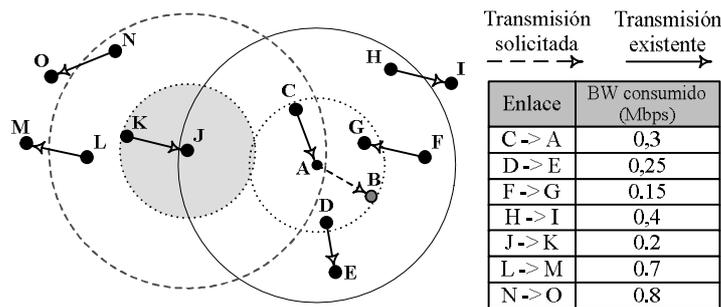


Fig. 7. Comparación de los métodos de estimación del ancho de banda disponible

$$\text{MÉTODO 2: } BW_{av} = 2Mbps - (0,3Mbps + 0,25Mbps + 0,15Mbps) = 1,4Mbps$$

$$\text{MÉTODO 3: } BW_{av} = 2Mbps - (0,3Mbps + 0,25Mbps + 0,15Mbps + 0,4Mbps + 0,2Mbps) = 0,8Mbps$$

De acuerdo a los métodos 2 y 3, el nodo A tiene suficiente ancho de banda para iniciar la comunicación hacia el nodo B. Sin embargo, se debe analizar la capacidad de los nodos vecinos a A, en particular la situación del nodo J. Si se aplica el método 3 para calcular el ancho de banda disponible en el nodo J se tiene:

$$\text{MÉTODO 5: } BW_{av_{NODOJ}} = 2Mbps - (0,2Mbps + 0,7Mbps + 0,8Mbps) = 0,3Mbps$$

Analizando los vecinos dentro del rango de interferencia del nodo A, se tiene que la estimación exacta del ancho de banda disponible es de 0,3 Mbps. Esto quiere decir que el nodo A no tiene suficiente ancho de banda para iniciar una transmisión hacia B.

## II.2. PREDICCIÓN DEL ANCHO DE BANDA CONSUMIDO EN UNA RUTA

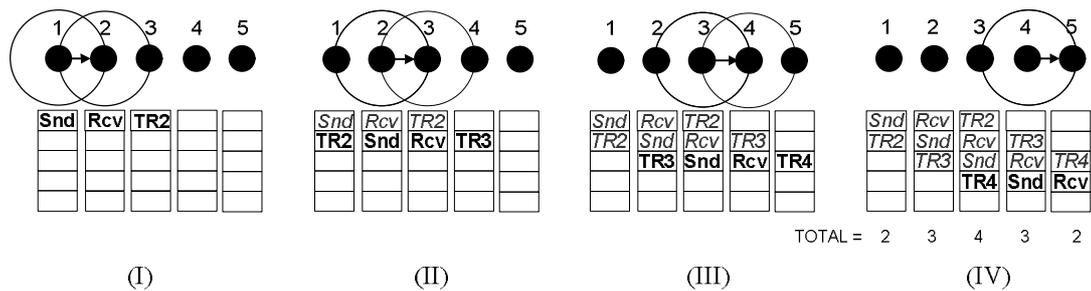
Para aceptar un flujo no basta con comparar el ancho de banda disponible y el requerido por el flujo. Se debe además verificar si los requerimientos del flujo se ajustan a toda la ruta de n saltos. Lo anterior permitirá implementar control de admisión durante el proceso de descubrimiento de ruta.

### II.2.1 Método 1

Este método planteado en [10], asume que el rango de transmisión es igual al rango de interferencia y se puede enunciar así:

En una ruta de  $n$  saltos, en el nodo fuente y destino se debe cumplir que  $BW_i \geq 2r$ , en el segundo nodo y en el  $n-1$  que  $BW_i \geq 3r$  y en los nodos intermedios que  $BW_i \geq 4r$ . Donde:  $r$ , es el ancho de banda solicitado por la fuente y  $BW_i$ , es el ancho de banda disponible en el nodo  $i$ .

Por ejemplo, si se tiene una red de 5 nodos (Fig. 8), donde el nodo 1 es la fuente y el nodo 5 es el destino, se puede observar que cuando el nodo 1 transmite a 2, el nodo 3 recibe el paquete CTS, enviado por 2, ya que está dentro su rango de transmisión. Cuando es el nodo 2 el que transmite, el nodo 1 escuchará el RTS del nodo 2 y permanecerá en silencio porque entenderá que el canal está siendo utilizado. De la misma manera el nodo 4 recibe el paquete CTS de 3 y también permanecerá en silencio. La secuencia completa puede observarse en la Fig. 8. En conclusión, cuando el nodo 1 envía una petición de ruta hacia 5, cada nodo debe comprobar si dispone del ancho de banda suficiente: el nodo 1 debe tener disponible el doble del ancho de banda solicitado, el nodo 2 el triple, el nodo 3 el cuádruple y así hasta llegar al nodo destino.



Snd: Sender, Rcv: Receiver, IRn: node is in the Interference Range of node n, TRn: node is in the Transmission Range of node n, CC: Contention Count

Fig. 8. Ejemplo método 1 de estimación del ancho de banda consumido

### II.2.2 Método 2

Este método, descrito en [11], adiciona un nuevo parámetro llamado CC (*Contention Count*). Además, asume que el rango de interferencia es el doble del rango de transmisión, lo cual lo hace más realista que el método 1. Este método toma en consideración plenamente los efectos de la interferencia mutua entre paquetes de un mismo flujo, tal y como se describió en la sección II. En su versión original, este método plantea la utilización de dos contadores en cada nodo, el  $h_{req}$  (indica la distancia a la fuente) y el  $h_{rep}$  (indica la distancia al nodo destino). Gracias a estos indicadores, los nodos pueden detectar su respectiva posición a lo largo de una ruta y con ello, estimar el ancho de banda que consumirá el flujo.

En la sección IV se describirá con más detalle el funcionamiento de este método y su implementación dentro de AQA-AODV.

### III. PROTOCOLOS DE ENCAMINAMIENTO CON CALIDAD DE SERVICIO EN REDES MÓVILES AD HOC

Las diferentes protocolos de encaminamiento utilizados en la actualidad en las redes ad hoc, han sido diseñados para descubrir y mantener rutas sin considerar parámetros de calidad de servicio. Sin embargo, estos protocolos son ahora el punto de partida para nuevos protocolos de encaminamiento donde proveer QoS es un objetivo fundamental. A continuación se hace una breve introducción a los protocolos de encaminamiento que se vienen utilizando en las redes ad hoc y posteriormente se describirán algunos esquemas de encaminamiento con calidad de servicio.

Generalmente los protocolos de encaminamiento en redes inalámbricas ad hoc, se agrupan en cuatro categorías cuyos criterios de clasificación no son excluyentes por lo que algunos protocolos podrán ser parte de más de una categoría (ver Fig. 9): i) según la interacción con los demás nodos y el papel que desempeña en la red, éstos pueden ser jerárquicos o planos; ii) según la importancia de la ubicación geográfica o posicionamiento global del nodo se pueden clasificar también en geográficos o no geográficos; iii) según el origen del encaminamiento, se consideran dos grupos, los que se encaminan directamente en el origen y los que tienen encaminamiento salto a salto; iv) finalmente, se pueden clasificar como proactivos, reactivos o híbridos, de acuerdo a la forma como se gestiona la información de encaminamiento. En los protocolos proactivos, cada nodo mantiene la información sobre la topología de la red en tablas de enrutamiento que se intercambian periódicamente entre ellos. La información sobre el encaminamiento se difunde por toda la red, de manera que cuando un nodo necesita un camino hacia un destino en concreto, ejecuta un algoritmo de búsqueda de posibles rutas utilizando la información que tiene guardada sobre la topología, permitiendo que se tenga una ruta disponible casi inmediatamente. Esta característica ofrece un buen comportamiento en situaciones donde la tasa de movilidad es alta, ya que las rutas a los destinos se calculan con mínimo retardo. Debido a que los protocolos de enrutamiento proactivos actualizan frecuentemente las rutas que establecen, generan alto tráfico de mantenimiento y actualización en la red, como consecuencia se provoca un alto consumo de ancho de banda y energía por la sobrecarga que se introduce en la red. Los protocolos proactivos más importantes son: DSDV (*Destination Sequence Distance Vector*) [12], OLSR (*Optimized Link State Protocol*) [6], WRP (*Wireless Routing Protocol*) [13], FSR (*Fish State Routing Protocol*) [14]. Los protocolos reactivos o bajo demanda, sólo crean rutas cuando es necesario. Estos protocolos no intentan mantener actualizada la información relativa a la topología de la red, y en lugar de ello, cuando necesitan una ruta, invocan un procedimiento de descubrimiento de rutas para encontrar el camino al destino deseado. El hecho de buscar una ruta solamente cuando es necesaria, provoca que se tenga un tráfico de control reducido, en comparación con los protocolos proactivos. Algunos protocolos de encaminamiento bajo demanda son: AODV (*Ad-hoc On-demand Distance Vector*) [5], DSR (*Dynamic Source Routing*) [15], TORA (*Temporally Ordered Routing Algorithm*) [16],

ABR (*Associativity-Based Routing*) [17]. De los protocolos reactivos sobresale AODV, el cual ha recibido especial atención debido a su simplicidad, bajo coste computacional y bajo tráfico de control. Está definido en la RFC 3561 y debido a la importancia de este protocolo con el tema desarrollado en esta tesina, se describe con mayor profundidad a continuación. Un resumen con la descripción de los demás protocolos de encaminamiento puede ser consultado en [18].

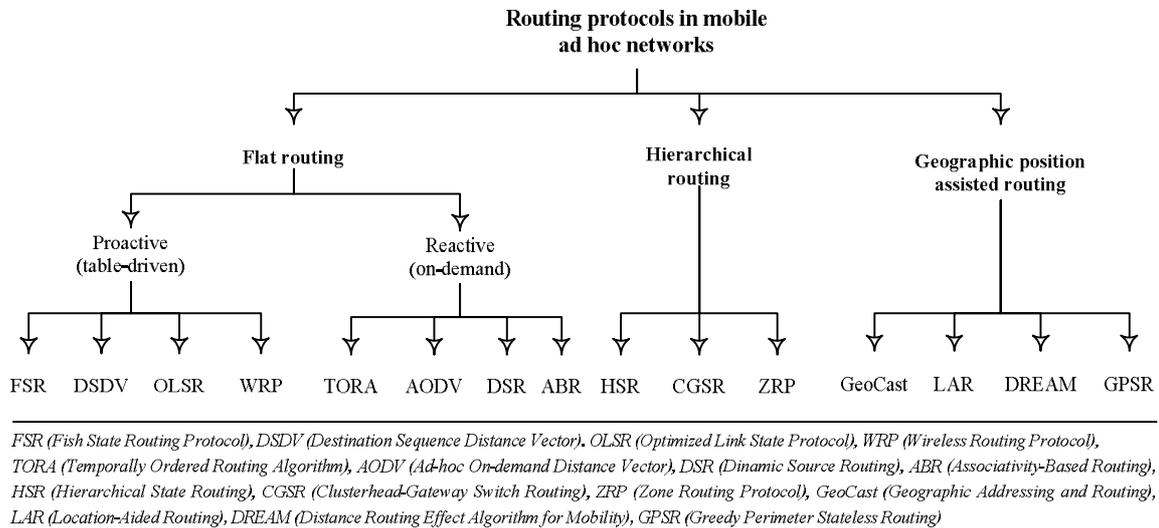


Fig. 9. Principales protocolos de encaminamiento en redes móviles ad hoc

### III.1. PROTOCOLO DE ENCAMINAMIENTO AODV

AODV utiliza una estrategia de encaminamiento bajo demanda, es decir, las rutas solamente son descubiertas cuando las fuentes las solicitan, esto permite eliminar las actualizaciones periódicas de rutas, difundiendo la información de encaminamiento solamente durante el tiempo que dura la transmisión, provocando una disminución del tráfico de control por la red. Por lo tanto, AODV es apropiado como protocolo de encaminamiento donde el ancho de banda es una limitación. Sin embargo, AODV solamente puede proveer servicios *best-effort* lo cual, no permite satisfacer requerimientos de calidad de servicio de las aplicaciones multimedia. El proceso de funcionamiento del AODV se describe a continuación:

En primer lugar se tiene el descubrimiento de vecinos, este proceso se lleva a cabo mediante la difusión de mensajes HELLO, cuyo TTL (*Time To Live*) es igual a uno, lo que garantiza que únicamente llegará a los vecinos a un salto. Este mensaje le permite a cada uno de los nodos de la red ofrecer información de conectividad a los vecinos.

1. El proceso de “descubrimiento de ruta” se inicia cuando un nodo necesita enviar información a algún nodo destino y no existe una ruta válida en sus tablas de encaminamiento.
2. El nodo fuente difunde un mensaje de petición de ruta (*RREQ, Route Request*) a los nodos que tiene a un salto y estos a su vez a sus vecinos, usando un procedimiento denominado búsqueda en anillo expandido, que empieza con un valor pequeño de tiempo de vida y se incrementa si el destino no ha sido encontrado. El paquete RREQ contiene el último número de secuencia de

destino conocido (*DestSeqNum*), además del número de secuencia actual del nodo fuente (*SrcSeqNum*).

3. Cualquier nodo que recibe el RREQ actualiza su tabla con el siguiente salto con dirección a la fuente. Un nodo intermedio que tiene una ruta al destino con un número de secuencia mayor que el especificado en el RREQ, envía de forma unicast de vuelta a la fuente, un paquete RREP (*Route Reply*) como respuesta de la petición.
4. Cada nodo intermedio que reenvíe el RREP en dirección a la fuente, registra en su tabla de encaminamiento una ruta hacia el nodo destino, descartando los paquetes RREP redundantes y aquellos con menor número de secuencia de destino que los previamente procesados.
5. Cuando el nodo fuente recibe un RREP, comprueba que el número de secuencia de destino (*DestSeqNum*) informado en el paquete de respuesta sea mayor que el número de secuencia que tenía almacenado para ese destino. Una vez la fuente recibe el mensaje RREP, se prepara para transmisión de los datos.

Es posible detectar la caída de un enlace mediante los mensajes HELLO o a través de los ACK del nivel de capa MAC; en este caso los extremos de la comunicación, fuente y destino, reciben la notificación. Si el nodo que descubre el enlace roto es un nodo intermedio, se envía un paquete denominado RERR (*Route Error*). Al recibir este paquete, los extremos de la comunicación borran la entrada correspondiente en sus tablas de encaminamiento y el nodo fuente reinicia el proceso de descubrimiento de ruta utilizando un nuevo identificador de solicitud de ruta (*RREQ\_ID*) y el número de secuencia de destino que tenía la entrada antigua.

AODV utiliza el concepto de números de secuencia de destino (*DestSeqNum*) para identificar el camino más actualizado. Además, cada nodo mantiene un contador de número de secuencia de fuente (*SrcSeqNum*) que se incrementa cuando el nodo adquiere información sobre un nuevo vecino y se usa para identificar las rutas obsoletas. La combinación de estos dos asegura un encaminamiento libre de bucles incluso cuando se reparan rutas.

En la Fig. 10 se describe el funcionamiento básico del protocolo AODV, por medio de un ejemplo. El nodo fuente identificado por el número 1, inicia el procedimiento de descubrimiento de rutas enviando a sus vecinos un paquete RREQ para encontrar un camino hacia el nodo 15. Se asume que el paquete RREQ contiene un número de secuencia de destino 3 y un número de secuencia de fuente de 1. Cuando los nodos 2, 5 y 6 reciben el RREQ, consultan en su tabla de encaminamiento una ruta hacia el destino. Si no tienen ninguna, retransmitirán el mensaje RREQ a sus respectivos vecinos. Ahora se asumirá que los nodos intermedios 3 y 10 ya disponen de una ruta hacia el destino deseado, es decir, el nodo tres tiene la ruta 3-7-9-13-15 y el nodo 10 conoce la ruta 10-14-15. Si el número de secuencia de destino para la ruta conocida por el nodo 10 es 4 y la ruta del nodo 3 tiene un número de secuencia de destino de 1, entonces solamente el nodo 10 tiene una ruta más actualizada que la ruta que conoce la fuente. El nodo 10 no retransmite a sus vecinos el paquete RREQ y responde a la fuente con un paquete RREP que contiene la ruta hacia 15. Si se

considera que el paquete RREQ llega a su destino (nodo 15) a través del camino 4-12-15 o cualquier otra ruta alternativa, el destino envía un mensaje RREP a la fuente. En este caso, a la fuente le llegarán varios paquetes RREP. Todos los nodos intermedios que reciban un paquete RREP actualizan sus tablas de rutas con el último número de secuencia, o incorporan una nueva ruta si se indica un camino más corto entre fuente y destino. En este ejemplo, al nodo fuente llegarán dos caminos alternativos, el que se forma por los nodos 1-5-10-14-15 y el camino formado por los nodos 1-5-4-12-15. Se elegirá este último como el más apropiado al tener mayor número de secuencia de destino, ya que ésta respuesta ha partido del propio nodo 15, que habrá aumentado su número de secuencia para responder.

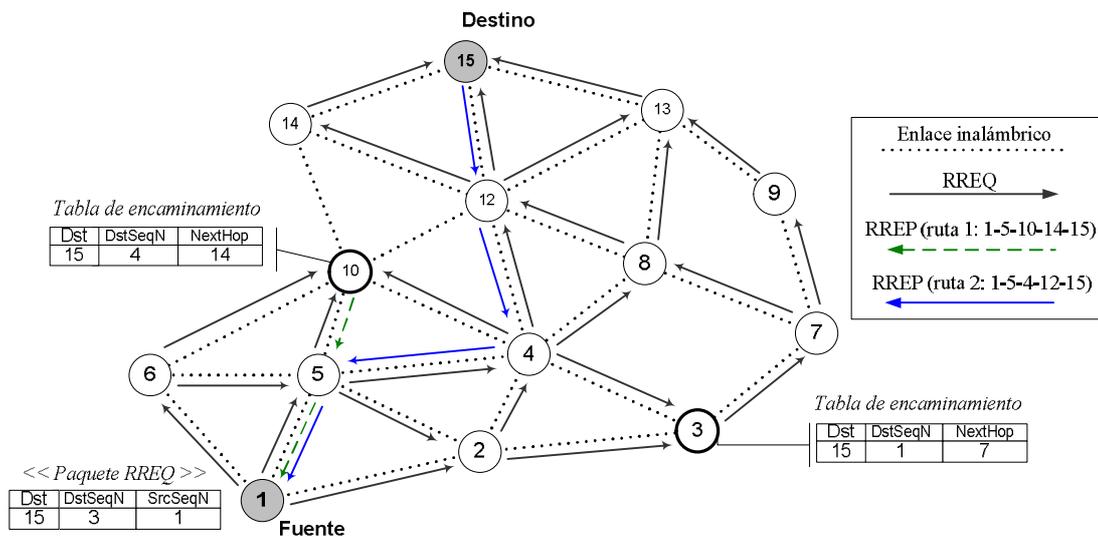
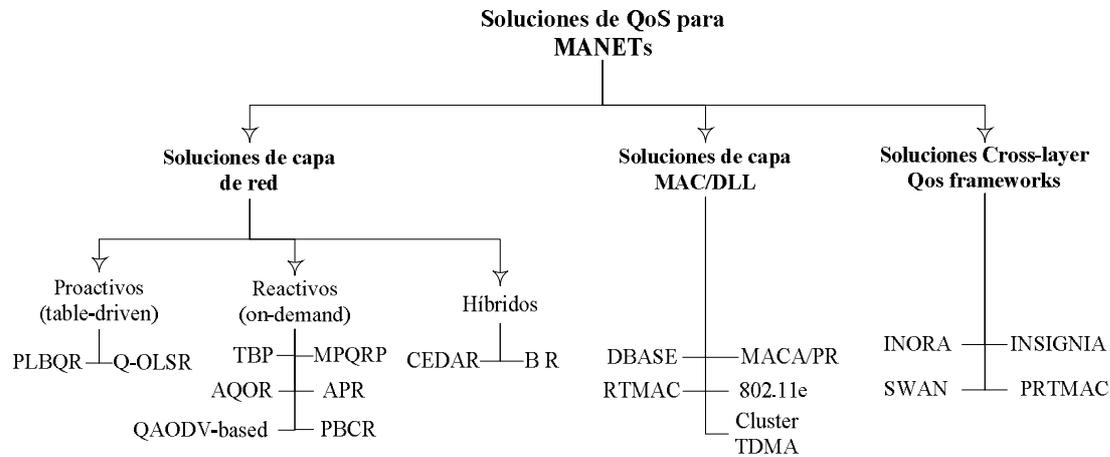


Fig. 10. Ejemplo de funcionamiento del protocolo AODV

### III.2. ESQUEMAS DE ENCAMINAMIENTO CON CALIDAD DE SERVICIO EN REDES MÓVILES AD HOC

Numerosos protocolos para gestionar la calidad de servicio en diferentes niveles de red han sido desarrollados para las redes fijas. Sin embargo, debido a las características del medio inalámbrico y a las interferencias entre los nodos, los modelos de calidad de servicio utilizados en redes fijas no son apropiados para redes inalámbricas ad hoc. Las diferentes soluciones de QoS planteadas para el entorno de las redes ad hoc se pueden clasificar de acuerdo a varios criterios, por ejemplo, de acuerdo a la interacción entre la capa de red de la capa MAC se pueden clasificar en independientes o dependientes; de acuerdo en los mecanismos de actualización de las rutas, en bajo demanda, proactivos o híbridos. Sin embargo, la clasificación más utilizada es la que se muestra en la Fig. 11, la cual clasifica las soluciones de QoS según la capa en la cual actúan: soluciones de capa de red, soluciones de capa MAC y soluciones multicapas o cross-layer. La solución planteada en esta tesina se enmarca dentro de la categoría de soluciones de QoS de capa de red, debido a esto, se han seleccionado algunos de los protocolos de QoS de capa de red más importantes con el fin de

analizarlos. En la Tabla 2 se presenta un resumen con las características básicas y en la Tabla 3, se analiza su funcionalidad. Las otras propuestas a nivel de capa MAC y cross-layer pueden ser estudiadas en [19].



*PLBQR (Predictive location-based QoS routing protocol), Q-OLSR (QoS for OLSR), TBP (Ticket-Based Probing), MPQRP (Multi-Path QoS Routing Protocol), AQOR (Adhoc QoS On-demand routing), APR (Adaptive Proportional Routing), QAODV-based (QoS for AODV), PBCR (Path Bandwidth Calculation Routing), CEDAR (Core Extraction Distributed Ad Hoc Routing), BR (Bandwidth Routing), DBASE (Distributed Bandwidth Allocation/ Sharing Extension Protocol), RTMAC (Real-Time MAC), SWAN (Stateless Wireless Ad hoc Networks), PRTMAC (Proactive RTMAC).*

Fig. 11. Clasificación de las soluciones de QoS para MANETs de acuerdo a la capa en que actúan

Protocolo	Escalabilidad	Fortalezas	Evaluación desempeño	Otros
TBP [20]	Baja	Reparación de rutas	Análisis Teórico, simulación	Control de sobrecarga por medio de tickets Requiere excesiva memoria en los nodos
PBCR [21]	Media-baja	Reparación de rutas	Análisis Teórico, simulación	Basado en TDMA. Óptimo para redes pequeñas y de baja movilidad
MPQRP [22]	Media	Multipath	Simulación	Funcionamiento por tickets, similar a TBP, pero no limitados. Alta sobrecarga
BR [23]	Baja	Mantiene rutas secundarias	Simulación	Basado en DSDV, considerable tráfico de control. Tiempo de propagación alto.
PLBQR [24]	Baja	Rutas alternativas	Análisis, Simulación	Basado en la predicción de la ubicación de los nodos y del retardo.
AQOR [25]	Alta	Temporizador de rutas.	Simulación	Control de admisión y baja sobrecarga. Control del retardo fuente-destino
QOLSR [4]	Media	Inundación controlada	Simulación	Mantiene tablas de encaminamiento. Baja latencia. Alta sobrecarga.
Q-AODV [3]	-	-	Análisis Teórico.	IEFT-Draf que define las extensiones de AODV para soportar QoS.
BEQR-Chen [26]	Media	Reparación de rutas	Simulación	Dos esquemas: control de admisión y control adaptativo de la tasa de envío.
QoSAODV-DeRennesse[27]	Media	Monitoreo de QoS en rutas	Simulación	3 mecanismos: análisis de recursos, control de admisión y diferenciación de tráfico.
QS-AODV - Zhang [28]	Media	Reparación local de rutas	Simulación	Control de admisión. No tiene en cuenta la contienda intraflujo.
AQA-AODV	Media	Reparación de rutas.	Simulación	Realimentación de la máxima tasa de transmisión que la red puede soportar.

Tabla 2. Principales características de los protocolos de encaminamiento con QoS

La variable tamaño de los paquetes de control de la Tabla 3, se refiere a la cantidad de datos que es transportada en los paquetes durante el proceso de descubrimiento de rutas, suponiendo el peor caso. Por ejemplo, si un nodo debe enviar a paquetes con información de todos sus vecinos, el tamaño de los paquetes es expresado por  $O(n)$  para una red de  $n$  nodos, ya que en el peor de los casos, todos los nodos estarán dentro de su rango de transmisión.  $O(1)$  representa un tamaño fijo de paquetes e independiente del número de nodos en la red.

Protocolo	Prerequisitos	Calidad de Servicio		Descubrimiento rutas	
		Métricas	Reserva	Tipo	Tamaño paq. de control
TBP	P1, P2	R, AB	Si	Distribuida, Híbrida	$O(n)$
PBCR	P3, P4	AB, R	Si	Distribuida, reactiva	$O(1)$
MPQRP	P3, P7	AB	Si	Distribuida, reactiva	$O(t)$
BR	P3, P8	AB	Si	Distribuida, reactiva	$O(s)$
PLBQR	-	R	No	Distribuida, proactiva	$O(1)$
AQOR	P9	R, AB	Si	Distribuida, reactiva	$O(1)$
QOLSR	-	AB, R	No	Distribuida, proactiva	$O(n)$
Q-AODV	P2	AB, R	No	Distribuida, reactiva	$O(1)$
BEQR-Chen	-	AB	No	Distribuida, reactiva	$O(1)$
QoSAODV-DeRennesse	-	AB	No	Distribuida, reactiva	$O(1)$
QS-AODV – Zhang	-	AB	No	Distribuida, reactiva	$O(1)$
AQA-AODV	-	AB	No	Distribuida, reactiva	$O(1)$

*Pre-requisitos: P1- Protocolo MAC con reservación de recursos. P2- Algoritmo que determine el estado de la red, P3- Medio sincronizado (Time slots), P4- Protocolo bajo demanda (por ejemplo AODV), P5- rutas explícitas para cada combinación fuente-destino, P6- Información de la topología de la red. P7- Múltiples transceptores por host que pueden funcionar simultáneamente, P8- Reloj de red o mecanismo de sincronización. P9- IEEE 802.11 DCF Variables:  $n$ : número de nodos,  $t$ : número de tickets,  $s$ : número de time slots por trama, R: retardo, AB: ancho de banda*

Tabla 3. Protocolos de encaminamiento con QoS– Capacidad y pre-requisitos

Es necesario resaltar que la mayoría de los protocolos de QoS son protocolos bajo demanda y con búsqueda de rutas a través de toda la red (Distribuida). También se evidencia varias soluciones basadas en AODV, por esto a continuación se profundizará en QAODV ya que ha servido de referencia en numerosos trabajos de investigación.

### III.2.1 Q-AODV, Calidad de servicio para AODV.

Q-AODV [3] es una extensión mejorada del protocolo reactivo AODV que propone adicionar a los paquetes RREQ, RREP y RRER una cabecera de QoS, para que los nodos puedan intercambiar información sobre el estado de la red. También es necesario agregar nuevos campos a las tablas de encaminamiento de los nodos, así como incorporar un control de admisión. Los nuevos parámetros de son: un identificador de sesión (*SessionID*) que será específico para cada flujo, ya que dos flujos diferentes hacia el mismo destino pueden tener diferentes requerimientos de QoS; máximo retardo solicitado y mínimo ancho de banda disponible.

Con la introducción de estos nuevos parámetros, QAODV plantea un nuevo modelo en la búsqueda y mantenimiento de rutas, basado principalmente en el cumplimiento de los requerimientos, de mínimo ancho de banda o máximo retardo, solicitado por la fuente. Es decir, una ruta será seleccionada, solo si todos los nodos a lo largo de dicha ruta pueden satisfacer los requerimientos de calidad de servicio solicitados por la fuente.

El establecimiento de rutas en QAODV, en comparación con el estándar AODV, se puede resumir en los siguientes pasos:

1. La petición de ruta (*RREQ*) se crea con el *SessionID*, en lugar de la dirección de nodo fuente como sucede en AODV.
2. Un nodo envía un mensaje RREQ a todos sus vecinos a un salto, indicando el ancho de banda solicitado en la cabecera de QoS.
3. Si un nodo intermedio tiene ancho de banda insuficiente, el paquete es rechazado, de lo contrario se crea ruta inversa (ruta de regreso a la fuente) con el *SessionID*. El mensaje RREQ es reenviado como en AODV, hasta que alcance el nodo destino.
4. El mensaje RREP sólo puede ser generado por el nodo destino ya que esto asegura que todos los nodos de la ruta satisfacen los requerimientos de ancho de banda.
5. Cuando un nodo destino recibe un mensaje RREQ: si es una nueva petición y tiene suficiente ancho de banda, se crea una entrada para ruta inversa para dicho identificador de sesión, el ancho de banda requerido es reservado y un mensaje RREP es transmitido a través de la ruta inversa. Si el destino ya ha recibido una petición similar, el mensaje RREQ es almacenado por si falla el RREP.
6. Cuando un nodo intermedio recibe un mensaje RREP: si el nodo tiene disponible aún el ancho de banda solicitado, actualiza en su tabla de encaminamiento la ruta hacia el destino teniendo en cuenta el *SessionID*; reserva el ancho de banda y reenvía el paquete al siguiente nodo en dirección a la fuente usando la ruta inversa. Si el nodo no puede cumplir con el ancho de banda solicitado, rechaza el mensaje RREP, genera un mensaje RERR con la bandera RREPFail activada y lo envía de regreso al nodo del cual recibió el RREP.

7. Cualquier nodo que reciba un mensaje RERR con RREPFail activado, invalida la ruta y reenvía el mensaje RERR al siguiente nodo, en dirección del nodo destino.
8. Cuando el nodo destino recibe el mensaje RERR, emite un nuevo RREP con otra ruta disponible.

El procedimiento para el mantenimiento de las rutas también es modificado con relación al estándar AODV, para explicar este proceso se va utilizar la Fig. 12.

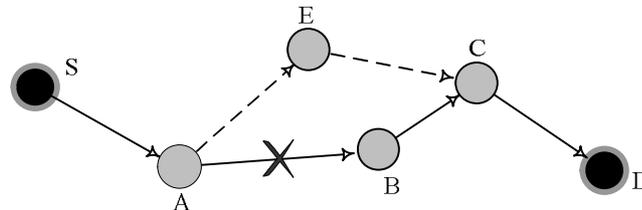


Fig. 12. Ejemplo de mantenimiento de conectividad de QAODV

En el esquema, la ruta original está dada por los nodos S-A-B-C y D, si el enlace A-B se cae, el nodo A envía un mensaje de reparación local RREQ para encontrar al nodo C. Cuando el nodo E recibe el mensaje RREQ, si tiene suficiente ancho de banda para la sesión, crea una ruta de regreso al nodo A y reenvía el mensaje RREQ a sus vecinos. Cuando el nodo C recibe el mensaje RREQ genera un mensaje de reparación local RREP y lo envía de regreso al nodo A. Cuando el nodo E recibe el mensaje RREP, crea un registro para la ruta de reenvío, reserva el ancho de banda solicitado y luego reenvía el mensaje RREP hacia A; por lo tanto la nueva ruta es S-A-E-C-D. Si un mensaje RREQ de reparación, expira entonces se envía un mensaje RERR, el cual es reenviado hasta el nodo fuente.

Aunque el modelo planteado por Q-AODV define el establecimiento de rutas de acuerdo a parámetros de calidad de servicio, como el ancho de banda o el retardo, en la versión IETF-Draft de Q-AODV no se especifican los algoritmos utilizados para estimar y difundir la información de dichos parámetros. Esto ha dado lugar al desarrollo de múltiples algoritmos que permiten ser integrados a la estructura de Q-AODV y que solucionan el problema de la estimación de recursos en las redes ad hoc. Los principales algoritmos fueron estudiados en la sección anterior y posteriormente se explicará su integración dentro de AQA-AODV.

#### **IV. AQA-AODV: PROTOCOLO DE ENCAMINAMIENTO CON CALIDAD DE SERVICIO CON ESQUEMA DE REALIMENTACIÓN BASADO EN AODV**

En esta sección se describen los detalles del funcionamiento y características del protocolo de encaminamiento propuesto, llamado AQA-AODV (*Adaptive QoS-Aware Ad-hoc On-demand Distance Vector*). Tal como se ha mencionado anteriormente, AQA-AODV se basa en el protocolo reactivo AODV (*Ad-hoc On-demand Distance Vector*) al cual se le ha añadido un esquema de realimentación que permite a la fuente de tráfico, adaptar su tasa de transmisión de acuerdo a la disponibilidad de la red. Las principales modificaciones afectan las fases de establecimiento y reparación de rutas de AODV, durante las cuales, se utiliza una extensión realizada a los paquetes de señalización de AODV. Esta extensión (similar a la propuesta en [3]) incluye nuevos campos en los paquetes RREQ, RREP y RERR: uno utilizado para informar el ancho de banda requerido y otro para el identificador de sesión (*SessionID*), los cuales, son utilizados para identificar cada flujo que se cursa por la red. Sin embargo, la solución descrita en la referencia [3] es un protocolo diseñado bajo un esquema de control de admisión en el cual una ruta es establecida solo si cumple con los parámetros de QoS solicitados por la fuente. Además como se mencionó anteriormente, no se definen los algoritmos para la estimación del ancho de banda ni para la predicción del ancho de banda consumido.

La principal diferencia de AQA-AODV con otras soluciones basadas en AODV es el esquema de realimentación adaptativa por el cual el nodo fuente puede adaptar su tasa de transmisión de acuerdo al estado de la ruta. Por esta razón, los nodos a lo largo de la ruta deben incorporar algoritmos que les permita estimar la disponibilidad de recursos (en términos de ancho de banda).

A continuación, se describen las fases de establecimiento de rutas, de recuperación de la conectividad y los mecanismos para la estimación del ancho de banda y la predicción del ancho de banda consumido, implementados en AQA-AODV.

##### *IV.1. ESTABLECIMIENTO DE RUTAS*

En AQA-AODV, las rutas se establecen de acuerdo a los requerimientos de las aplicaciones en el nodo fuente. En el diseño propuesto, las aplicaciones indican en el mensaje de petición de ruta el mínimo ancho de banda que debe ser garantizado por la red. Si la red no puede soportar este requerimiento, la aplicación ajusta su tasa de envío de acuerdo a la información que recibe de la red (esquema de realimentación).

Cuando un nodo hace una solicitud de ruta a un destino, difunde un paquete QRREQ (*QoS-RREQ*, paquete RREQ con soporte de QoS) a todos sus vecinos. Cuando un nodo recibe un paquete QRREQ, se crea una ruta inversa con el identificador de sesión respectivo y el paquete es reenviado de modo broadcast a todos sus nodos vecinos, tal como sucede en AODV. Este proceso continúa hasta que el paquete QRREQ alcanza el nodo destino. En AODV, el nodo destino o

cualquier nodo intermedio que tenga una ruta hacia el destino puede responder a la petición de ruta por medio de un paquete RREP. Sin embargo, en AQA-AODV solamente el destino está habilitado para responder a la petición de ruta. Esto asegura que todos los nodos a lo largo de la ruta seleccionada satisfacen el ancho de banda solicitado. Cuando el nodo destino recibe un paquete QRREQ, crea un registro en su tabla de encaminamiento para la nueva sesión y antes de responder con el paquete QRREP (*QoS-RREP*, paquete RREP con extensión para QoS), consulta su ancho de banda disponible. Sin embargo, esta consulta no es suficiente para determinar si la ruta puede garantizar el ancho de banda solicitado por la fuente en el mensaje QRREQ. La razón es la interferencia existente entre paquetes del mismo flujo y que en adelante se llamará “*contienda intraflujo*” tal y como se ha definido en la sección II. Por lo tanto, es necesaria una comprobación adicional en el nodo destino. Para estimar la *contienda intraflujo*, se utiliza la relación entre el número de saltos y el throughput global. Como el nodo destino es el último nodo en la ruta, este puede determinar su distancia desde el nodo fuente (gracias al número de saltos en el paquete QRREQ) y por lo tanto estimar el ancho de banda consumido a lo largo de la ruta. El mecanismo implementado se describe con más detalle en la sección IV.2.

Finalmente, el paquete QRREP será transmitido a la fuente indicando el mínimo valor entre el ancho de banda requerido por la fuente y el máximo ancho de banda que toda la ruta podría garantizar, teniendo en cuenta la *contienda intraflujo*. La Fig. 13a describe el procedimiento que se ejecuta cuando un nodo recibe un paquete QRREQ.

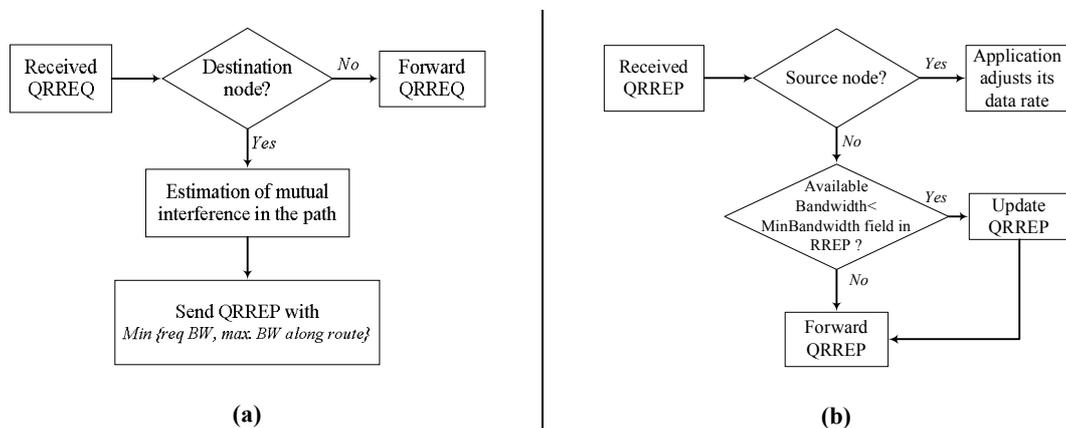


Fig. 13. Procedimiento después de que se recibe un QRREQ (a) y un QRREP (b)

Una vez un nodo intermedio recibe el mensaje QRREP, compara su ancho de banda disponible con el ancho de banda informado en el paquete QRREP. Si su ancho de banda disponible es menor, se cambia el valor del campo “*rate*” en el paquete QRREP por el ancho de banda disponible en dicho nodo. De lo contrario, el nodo reenvía el paquete QRREP. Este procedimiento asegura que la fuente recibirá el mínimo ancho de banda a lo largo de la ruta y que será la máxima tasa de envío a la que podrá transmitir.

#### IV.2. ESTIMACIÓN DEL ANCHO DE BANDA DISPONIBLE

Un componente fundamental del protocolo de encaminamiento implementado, es la estimación del ancho de banda. El método utilizado es similar al presentado en [25] y consiste en sumar el tamaño de los paquetes enviados, recibidos y detectados en un periodo fijo de tiempo  $T$ . El ancho de banda disponible ( $BW_{av}$ ) puede ser estimado de acuerdo a la ecuación (13). Donde  $S$  es el tamaño de todos los paquetes (en bits) enviados desde la fuente hacia el destino durante un intervalo de tiempo  $T$ , donde  $T = Tr - Ts$  (ver Fig. 14)

$$BW_{av} = \frac{S}{Tr - Ts} \quad [bits/seg.] \quad (13)$$

En la Fig. 14 se observa que  $Ts$  es el instante de tiempo en el cual el paquete de datos está listo para ser enviado por la fuente, mientras que  $Tr$  es el instante de tiempo en el cual la fuente recibe el ACK.

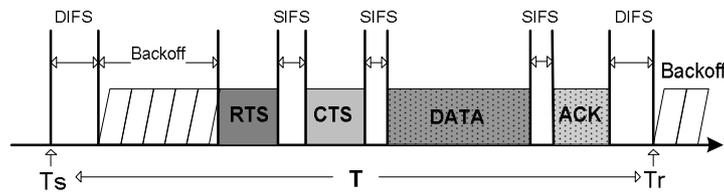


Fig. 14. Transmisión de un paquete según el estándar IEEE 802.11 con DCF

Usando la ecuación (13), el efecto de la contienda por acceder al canal y los errores por interferencia y congestión, son tenidos en cuenta cuando se estima el ancho de banda disponible. Si la contienda por acceder al canal es alta, el intervalo de tiempo  $T$  se incrementará y como resultado el ancho de banda disponible disminuirá de acuerdo a la ecuación (13). Igualmente, si hay errores en la transmisión de los paquetes de señalización o en los paquetes de datos y es necesario hacer retransmisiones, el tiempo  $T$  también será mayor y por lo tanto se producirá una disminución del ancho de banda disponible. Con el fin de implementar el método de estimación de ancho de banda descrito anteriormente, se propone utilizar la señalización HELLO ya existente en AODV. Esto significa que la estimación del ancho de banda en cada nodo, se realizará cada vez que se emiten mensajes HELLO (intervalo aleatorio entre 0.75 a 1.25 segundos). Sin embargo, son necesarias varias modificaciones, al mecanismo HELLO original de AODV ya que es necesario transportar los valores de  $Ts$  y  $Tr$ . Las principales modificaciones realizadas fueron:

1. Un nuevo campo en el mensaje HELLO, en el cual cada nodo informa el instante de tiempo ( $Ts$ ) en el que el mensaje HELLO está listo para ser enviado.
2. Un nuevo mensaje de señalización, llamado HELLOACK, utilizado para enviar de regreso a la fuente, el valor de  $Ts$ .

3. Implementación del algoritmo de estimación del ancho de banda disponible.
4. Creación de un nuevo campo en la lista caché de vecinos, para almacenar las estimaciones de ancho de banda.

El procedimiento que sigue un nodo para estimar el ancho de banda disponible se puede resumir así:

1. El nodo envía un mensaje HELLO y almacena el tiempo de salida de dicho paquete en el campo  $T_s$  de la cabecera.
2. Cuando un nodo recibe un mensaje HELLO, responde con un mensaje HELLOACK que lleva en su cabecera el valor de  $T_s$  recibido en el paquete HELLO.
3. Un nodo que recibe un mensaje HELLOACK, identifica el instante de tiempo en el cual recibe dicho mensaje ( $T_r$ ) y lo utiliza, junto con el tiempo  $T_s$  (almacenado en la cabecera del paquete HELLOACK) para calcular el tiempo  $T$  ( $T = T_r - T_s$ ). Es decir,  $T_s$  es el instante de tiempo cuando el paquete HELLO está listo para ser enviado por la fuente y  $T_r$  es el instante de tiempo cuando el HELLOACK es recibido en la fuente.
4. El nodo ejecuta el algoritmo de estimación del ancho de banda disponible según la ecuación (14), la cual es una ampliación de (13):

$$BW_{av} = \frac{S}{T_Q + (T_{Hello} + T_{HelloAck} + T_{CA} + T_{OH}) * R + \sum_1^R B_T} \quad [bits/seg] \quad (14)$$

Donde  $S$  es la sumatoria de los tamaños de los paquetes  $RTS$ ,  $CTS$ ,  $HELLO$ ,  $ACK$  y  $HELLOACK$ .  $T$  se puede definir como la sumatoria del tiempo utilizado para enviar los paquetes HELLO y HELLOACK ( $T_{Hello}$ ,  $T_{HelloAck}$ ), el tiempo en cola ( $T_Q$ ), el tiempo utilizado en prevenir colisiones ( $SIFS$ ,  $DIFS$ )  $T_{CA}$ , la duración de la fase de control de sobrecarga ( $RTS$ ,  $CTS$ )  $T_{OH}$  y el tiempo usado en las cuentas regresivas (back-off time  $B_T$ ) para  $R$  retransmisiones.

5. Finalmente, cada nodo almacena su estimación de ancho de banda en su lista de vecinos.

La Fig. 15 ilustra el funcionamiento de las fases de estimación del ancho de banda y de descubrimiento de rutas de AQA-AODV.

### IV.3. PREDICCIÓN DEL ANCHO DE BANDA CONSUMIDO POR UNA RUTA

Cuando el nodo destino recibe un paquete QRREQ con el valor del ancho de banda solicitado, este comprueba que dispone de ancho de banda suficiente para cursar el tráfico y además debe establecer si la ruta de  $n$ -saltos es capaz de soportar dicho tráfico, teniendo en cuenta la contienda intraflujo (interferencia entre paquetes del mismo flujo). El método utilizado en AQA-AODV, fue adaptado de [11] e introduce un nuevo parámetro denominado “*Contention Count*” utilizado en la predicción del ancho de banda consumido a lo largo de una ruta. Este método, asume que el rango

de interferencia de los nodos inalámbricos, es el doble del rango de transmisión. También se asume que los nodos a un salto están dentro del rango de transmisión y en el rango de interferencia están los nodos a dos saltos, tal como se muestra en la Fig. 16. Esto provoca algunas imprecisiones, ya que algunos nodos que están a tres saltos de distancia, también podrían estar dentro del rango de interferencia. Aunque el método original fue diseñado originalmente para protocolos de encaminamiento basados en control de admisión, fue adaptado para el esquema de realimentación de AQA-AODV.

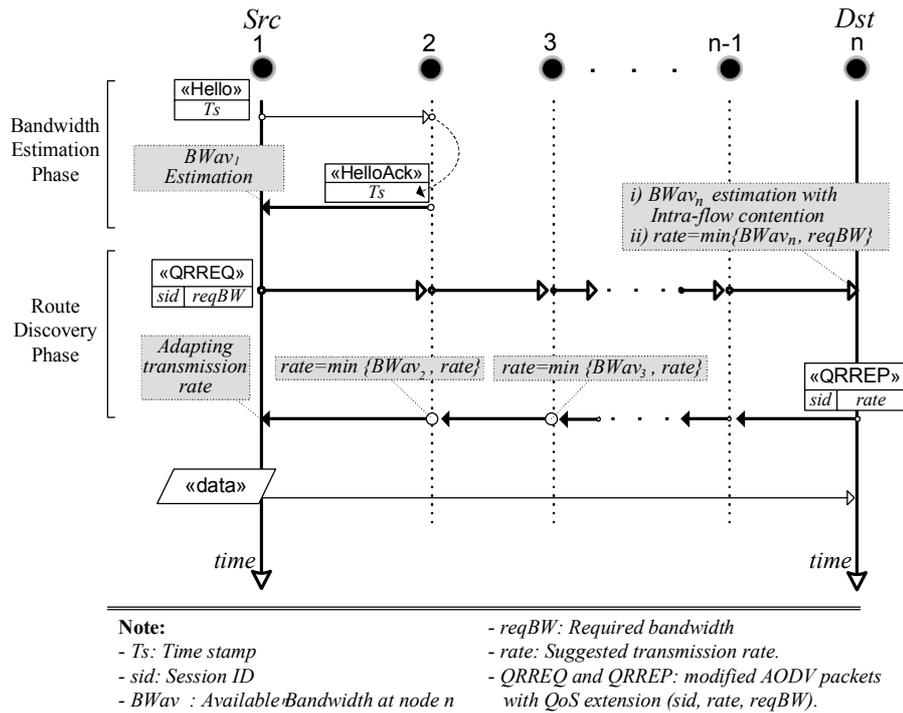


Fig. 15. Funcionamiento general de AQA-AODV

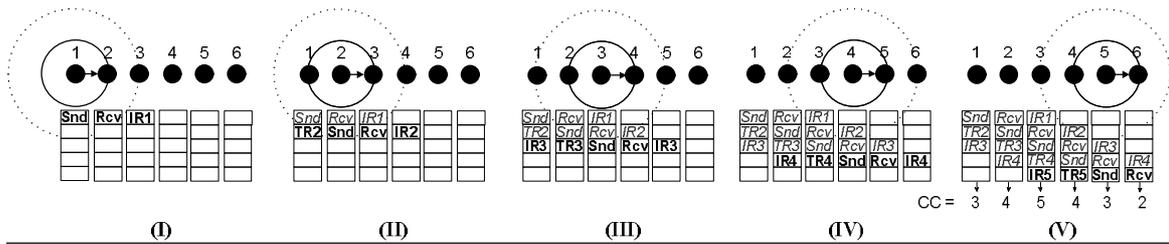
El parámetro *contention count* (CC) es calculado así:

$$\text{Si } h_{req} > 2 \rightarrow h_{req} = 2$$

$$\text{Si } h_{rep} > 3 \rightarrow h_{rep} = 3$$

$$CC = h_{req} + h_{rep}$$

Los parámetros  $h_{req}$  y  $h_{rep}$  corresponden a la distancia (número de saltos) de un nodo al nodo fuente y al nodo destino, respectivamente. En la Fig. 16 se ilustra un ejemplo, en el cual un flujo se transmite desde el nodo 1 al nodo 6. Para el caso del nodo 3,  $h_{req}$  es 3 y  $h_{rep}$  es 3, luego  $CC = 2 + 3 = 5$  de acuerdo a las reglas definidas anteriormente. Finalmente en la Fig. 16 se muestra el cálculo de CC para cada nodo de acuerdo al número de nodos en los rangos de interferencia y de transmisión.  $IRn$  indica que el nodo está dentro del rango de interferencia del nodo  $n$ . Por ejemplo, cuando el nodo 3 está transmitiendo al nodo 4, los nodos 1, 2 y 5 estarán inhabilitados para transmitir, ya que ellos comparten el canal con el nodo 3.



Snd: Sender, Rcv: Receiver, IRn: node is in the Interference Range of node n, TRn: node is in the Transmission Range of node n, CC: Contention Count

Fig. 16. Cálculo de la contienda intraflujo

#### IV.4. MECANISMO ADAPTATIVO DE RECUPERACIÓN DE RUTAS

Debido a los cambios de la topología a causa de la movilidad de los nodos y a la condición de tener un medio físico compartido, las comunicaciones dentro de MANETs usualmente presentan continuas interrupciones. Es por esto que se hace necesario implementar un mecanismo de recuperación de rutas, que no solamente permita reestablecer las conexiones, sino que además tenga en cuenta las condiciones de calidad de servicio que se han establecido durante la fase de descubrimiento de rutas.

El algoritmo de recuperación de rutas implementado en AQA-AODV detecta las pérdidas de conexión a lo largo de una ruta, cuando un host no recibe un mensaje HELLO desde un vecino específico, durante un intervalo tiempo predefinido. Los mensajes HELLO pueden no ser recibidos por dos motivos principales:

1. Por congestión: todos los nodos son alcanzables por sus vecinos, pero debido a la congestión se han perdido algunos mensajes HELLO.
2. El nodo vecino ya no está disponible porque ha salido del área de cobertura. En este caso se debe buscar una nueva ruta hacia el destino.
3. El nodo ya no está disponible en la red ad hoc.

El mecanismo de recuperación de rutas implementado en AQA-AODV, se adapta perfectamente a cualquiera de los dos primeros casos, para los cuales es posible recuperar la conectividad. Para explicar más detalladamente el funcionamiento del algoritmo de recuperación de rutas, se plantean dos ejemplos a continuación, uno por cada tipo de error de conexión. El ejemplo mostrado en la Fig. 17, consiste en una red de cuatro nodos, donde cada nodo está dentro del rango de transmisión de su vecino y dentro del rango de interferencia de su vecino a dos saltos. El nodo 1 (nodo fuente) difunde un mensaje QRREQ para solicitar una ruta hacia el nodo 4, con una tasa de transmisión de 1 Mbps. Cuando el nodo destino comprueba que máximo puede soportar 0,5 Mbps<sup>1</sup>, se lo informa a la fuente por intermedio de un mensaje QRREP. A medida que el mensaje QRREP recorre la ruta hacia la fuente, cada nodo verifica su ancho de banda disponible y lo compara con el informado en el mensaje QRREP, tal como se describió en los apartados anteriores y que se será

<sup>1</sup> 0,5 Mbps es la tasa máxima que puede ser soportada por una ruta de 4 nodos para un canal de 2 Mbps. Ver sección II.

referido en adelante como procedimiento estándar de establecimiento de ruta. Además, cada nodo crea un registro en la lista caché de sesiones (*Session Cache*) asociado a un identificador de sesión (*sid*) y a un tiempo de expiración (*Expiration Time*), que permite que los registros antiguos sean eliminados (ver Fig. 17a). Una vez se establece la ruta desde el nodo 1 hasta el nodo 4, los paquetes de datos son enviados a través de la red. Cada vez que los nodos reciben un paquete de datos correspondiente a dicha sesión, se actualiza el tiempo de expiración de los registros, evitando así su eliminación. Si se asume que debido a la congestión se pierden varios mensajes HELLO emitidos por el nodo 4, el nodo 3 detecta una pérdida de conexión y envía en dirección a la fuente un mensaje de error (RERR) informando el identificador de la sesión afectada (ver Fig. 17b). Una vez recibido el mensaje de error por la fuente, ésta consulta su caché utilizando el identificador de sesión (*esid*) y envía un mensaje QRREQ informando la tasa solicitada, la tasa a la cual estaba transmitiendo y el identificador de sesión que había asignado a la conexión establecida con anterioridad (ver Fig. 17c). Cuando el nodo destino recibe el mensaje QRREQ, comprueba si tiene un registro en su caché con el identificador de sesión informado por la fuente y crea un paquete QRREP con el mismo número de sesión, la tasa máxima que puede soportar (la cual podría cambiar de acuerdo al cálculo del nodo destino) y con un indicador de respuesta inmediata ( $c = 1$  *immediate reply*,  $c = 0$  *standard reply*). El indicador de respuesta inmediata hace que los nodos intermedios no realicen el procedimiento estándar de verificación del ancho de banda disponible, sino que por lo contrario lo reenvían directamente al siguiente salto en dirección a la fuente. En conclusión, el algoritmo de recuperación de rutas intenta reestablecer la conexión hacia el destino con las condiciones de QoS que se habían precisado durante el establecimiento inicial de la ruta.

En el ejemplo de la Fig. 18, se asumen las mismas condiciones del ejemplo anterior. Sin embargo, se ha añadido un nodo (nodo 5) que no forma parte de la ruta activa entre el nodo 1 y el nodo 4. En la Fig. 18a se muestran los datos de la sesión previamente establecida en la red ad hoc, según el procedimiento visto anteriormente. Se asume también, que el nodo 4 se mueve en dirección contraria al nodo 3, lo cual provocará que en determinado momento esté por fuera del rango de transmisión y por tanto se ha de producir una pérdida de conexión.

La caída del enlace entre el nodo 3 y el 4, es detectada de manera similar al ejemplo anterior y la fuente es informada por un mensaje RERR. Sin embargo, de acuerdo a la topología de la red, es posible alcanzar el nodo destino por intermedio del nodo 5, el cual está dentro del rango de transmisión de 3 y de 4. Después de que el nodo 1 recibe el mensaje de error, envía una petición de ruta QRREQ de manera similar al ejemplo anterior. Sin embargo, el nodo 5 al procesar el mensaje no encuentra un registro asociado al identificador de sesión y debido a esto procede a cambiarlo. Gracias a esto, el nodo 4 descarta la información de la sesión anterior y procesa la petición de ruta de manera convencional. Así pues, calcula nuevamente su ancho de banda disponible y compara este valor con el solicitado por la fuente ( $1.0 Mbps$ ). La respuesta a la petición de ruta es enviado hacia la fuente a través de los nodos intermedios, los cuales, crean un nuevo registro en la caché de



1. Implementación de un mecanismo de estimación del ancho de banda residual en los nodos, mediante la modificación del formato del mensaje *HELLO* y la creación de un nuevo mensaje llamado *HELLOACK*.
2. Implementación de un agente cross-layer que permite intercambiar información entre la capa de aplicación y la capa de red. Mediante este agente se informa a la capa de red, el ancho de banda solicitado por la capa de aplicación y de igual manera el protocolo de encaminamiento informa a la fuente de tráfico, la tasa a la cual puede transmitir.
3. Modificación del procedimiento de descubrimiento de rutas (procesamiento del mensaje *QREQ*) y del procedimiento de respuesta (procesamiento del mensaje *QREP*).
4. Modificación de la caché de vecinos y de la tabla de encaminamiento, para incorporar el parámetro de calidad de servicio y el identificador de sesión.
5. Modificación del formato de los mensajes *RREQ*, *RREP* y *RERR* para introducir los parámetros de ancho de banda solicitado (*req\_BW*), identificador de sesión (*SessionID*), ancho de banda disponible (*av\_BW*).
6. Implementación de un mecanismo de recuperación de rutas que incluyó una modificación en los procedimientos de solicitud/respuesta de rutas y la creación de una caché de sesiones con las funciones necesarias para su gestión (*insert*, *update*, *purge*, *lookup*, *timer*).

#### IV.6. DIFERENCIAS ENTRE LOS PROTOCOLOS AQA-AODV Y QAODV

En la Tabla 4, se resumen las principales diferencias entre AQA-AODV y la versión original de QAODV, propuesta en la referencia [3].

CARACTERÍSTICAS	AQA-AODV	QAODV
<b>Esquema de funcionamiento</b>	Realimentación adaptativa	Control de admisión
<b>Mecanismos de QoS</b>	Estimación del ancho de banda (Método Hello) y del ancho de banda consumido.	No definido
<b>Métricas</b>	Ancho de banda	Ancho de banda y retardo
<b>Reparación de rutas</b>	Si	No
<b>Overhead</b>	Medio	Bajo
<b>Nuevos parámetros en comparación con AODV</b>	SessionID, request_bandwidth, available_bandwidth, immediate_reply,	SessionID, maximum_delay, Minimum_bandwidth,
<b>Otros</b>	Caché de sesiones. Algoritmo para informar a la capa de aplicación la tasa de transmisión. Nuevo mensaje: HELLOACK	Listado de fuentes que solicitan garantías de QoS. Nuevo mensaje: ICMP_QoS_Lost

Tabla 4. Resumen de las principales diferencias entre AQA-AODV y QAODV

## V. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

### V.1. ENTORNO DE SIMULACIÓN

El simulador de redes NS-2 ha sido utilizado para evaluar el funcionamiento del protocolo de encaminamiento con QoS planteado en esta tesis. Como protocolo de capa MAC se utilizó el IEEE 802.11 en modo DCF (*Distributed Coordination Function*) y un canal inalámbrico de 2 Mbps. El modelo de radio propagación utilizado fue *Two Ray Ground* y el tipo de cola es *Drop Tail* con longitud máxima de 50. Los rangos de transmisión y de interferencia son de 250m y 550m respectivamente.

#### V.1.1 Escenarios de simulación

El desempeño del protocolo desarrollado, fue evaluado junto con AODV, utilizando tres escenarios de simulación. El primer escenario es mostrado en la Fig. 19a y consiste de 7 nodos ubicados en una topología lineal que permite evaluar el funcionamiento de AQA-AODV en un ambiente determinístico. El segundo escenario es una cadena de nodos donde se evalúa el desempeño de los protocolos en cuestión, en función del número de nodos a lo largo de una topología en forma de cadena. El último escenario es una topología móvil de 30 nodos que se mueven en direcciones aleatorias.

Todos los flujos de tráfico son flujos CBR (*Constant Bit Rate*) sobre UDP, con paquetes de tamaño de 1000 bytes. En los escenarios estáticos, el nodo 1 es la fuente del tráfico y el último nodo de la cadena es el destino.

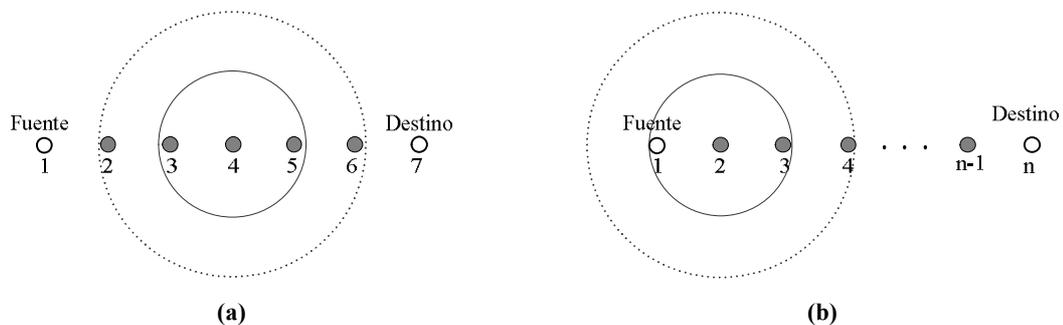


Fig. 19. Escenarios de simulación: Topología lineal nodos estáticos

### V.2. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Se ha evaluado el funcionamiento de AQA-AODV por medio de tres parámetros: retardo, pérdidas de paquetes y máximo throughput alcanzado a lo largo de la ruta. Cada punto mostrado en las figuras es la media de 10 simulaciones. El tiempo de simulación fue de 500 segundos y los resultados se presentan a continuación, de acuerdo a los escenarios mencionados anteriormente.

### V.2.1 Topología lineal de 7 nodos estáticos

En este escenario, la tasa de envío de paquetes del nodo fuente envía paquetes varía entre 0.1 y 1.3 Mbps. Como se puede observar en la Fig. 20, utilizando AQA-AODV, la fuente puede transmitir paquetes a la tasa solicitada, siempre y cuando dicha tasa pueda ser soportada por toda la ruta (por ejemplo para una tasa de transmisión entre 0.1 y 0.2 Mbps). Por otro lado, cuando la ruta no puede soportar eficientemente la tasa solicitada por la fuente, ésta ajusta su tasa al máximo valor que puede ser soportada por la ruta de 7 nodos (aproximadamente 0.2 Mbps).

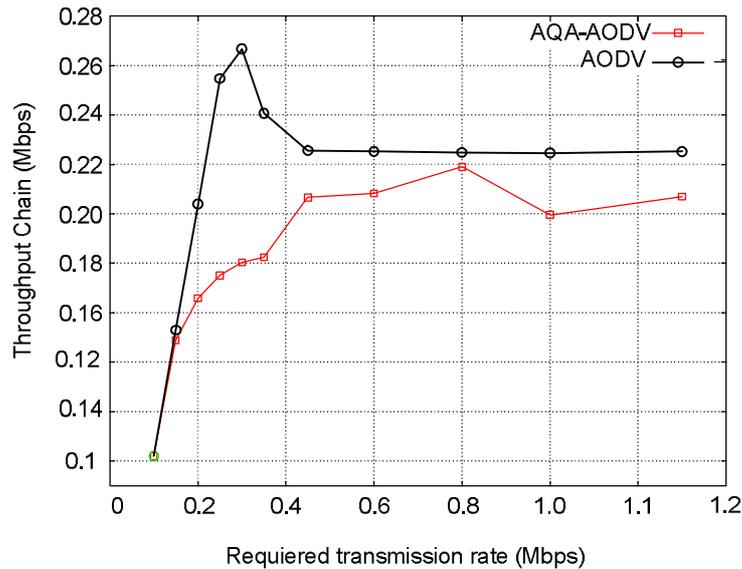


Fig. 20. Throughput a lo largo de una cadena de 7 nodos

Utilizando AODV, la fuente a no tener conocimiento del ancho de banda disponible, envía paquetes con una tasa igual a la solicitada. Sin embargo algunos paquetes no pueden ser reenviados eficientemente, tal como se describió en la sección 2, por lo tanto, las pérdidas y el retardo se incrementan significativamente. Esto se debe a la ausencia de un control de admisión o un mecanismo que adapte la tasa de envío y que evite la congestión de la red. Por otro lado, el desempeño de AQA-AODV en términos de retardo y pérdidas de paquetes es muy superior, comparado con AODV. Esto demuestra un uso eficiente del ancho de banda y una precisa predicción del ancho de banda consumido por parte de esquema de realimentación adaptativo.

Los resultados en términos de pérdidas y retardo son mostrados en la Fig. 21. Los resultados muestran que el esquema de realimentación, permite a la aplicación en el nodo fuente, adaptar su tasa de transmisión a una tasa cercana a la tasa óptima que puede ser soportada por la cadena de 7 nodos. En consecuencia, el total de paquetes perdidos se mantendrá por debajo del 9% y el retardo extremo a extremo, por debajo de los 0.5 segundos, aproximadamente un 83% menos que con AODV.

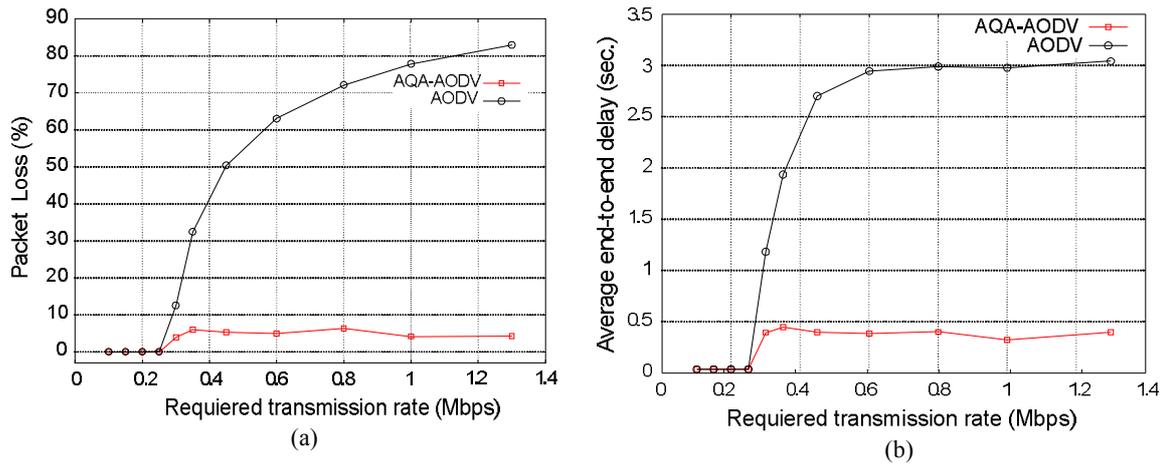


Fig. 21. Pérdidas de paquetes y retardo como función de la tasa de transmisión solicitada por la fuente

La Fig. 22 muestra el número de pérdidas de conexión y la latencia de reconexión (*CSL*, *Connection Setup Latency*) en la que se incurre al establecer una nueva conexión después de que se produce un fallo en la ruta (lo cual incluye la detección de la caída del enlace y el tiempo de reconexión.).

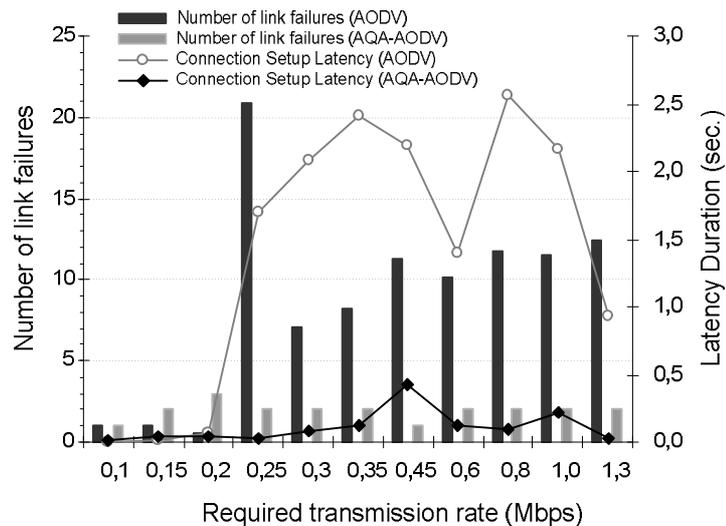


Fig. 22. Pérdidas de conexión

Cuando el máximo throughput que puede ser alcanzado a lo largo de una cadena de 7 nodos (aprox. 0.2 Mbps) se supera, el número de caídas de enlace, se incrementan drásticamente utilizando AODV. El esquema de realimentación en AQA-AODV, le permite a la fuente adaptar su tasa de transmisión y las pérdidas por congestión son evitadas en su mayoría. Además, la duración de estas caídas (valores de CSL) son también menores en AQA-AODV en comparación con AODV y varía de 0.01 a 0.5 seg, mientras que en AODV pueden llegar a ser de hasta 2,5 segundos. Por lo tanto AQA-AODV puede ser más eficiente en la transmisión de datos en tiempo real.

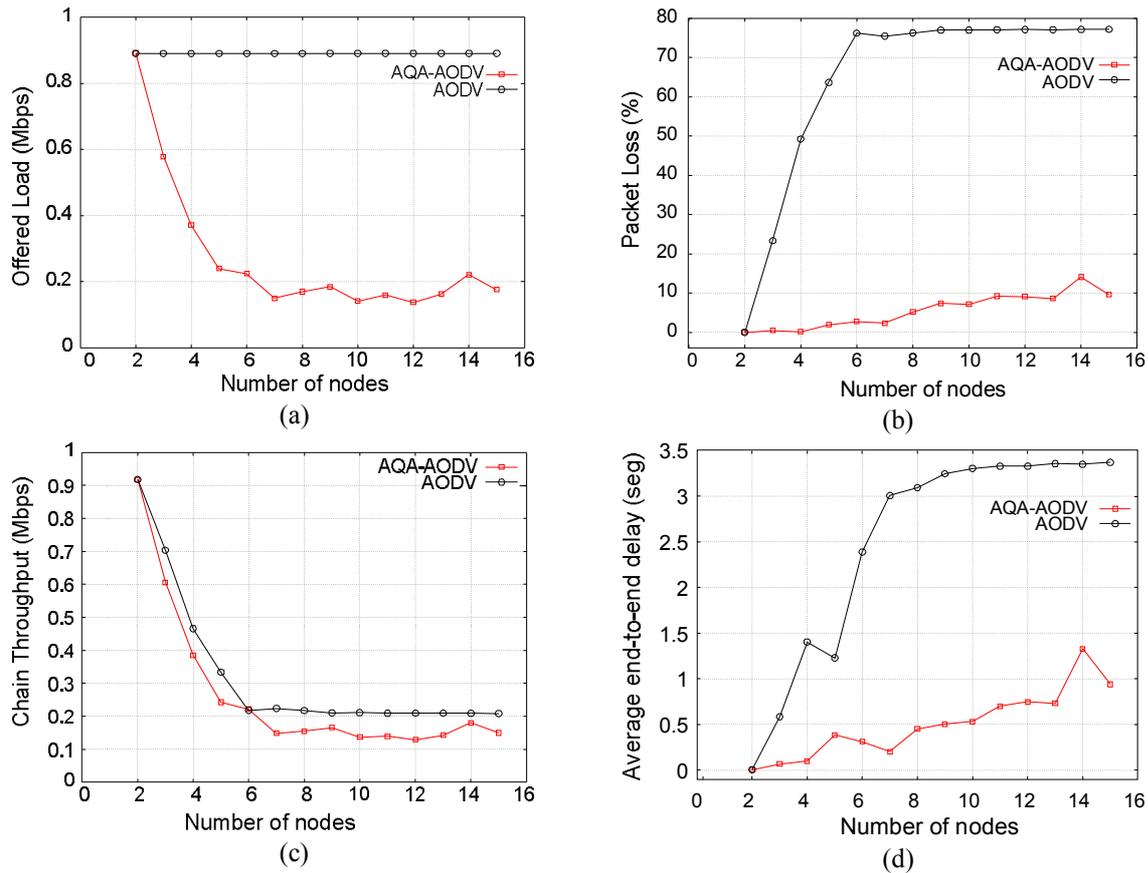


Fig. 23. (a) Tasa de transmisión de la fuente, (b) Pérdidas de paquetes, (c) Throughput y (d) Retardo, como función de la longitud de la ruta.

### V.2.2 Topología lineal estática de longitud variable

Como se observa en la Fig. 19b, este escenario de simulación consiste en una cadena de nodos estáticos de longitud variable. En este escenario se evalúa la capacidad que tiene AQA-AODV de adaptar sus mecanismos de estimación de recursos, de acuerdo al número de nodos que compiten por acceder al canal. La Fig. 23a muestra la habilidad de la fuente CBR adaptativa implementada, para ajustar su tasa de acuerdo al estado de la red y de acuerdo al número de nodos que compiten por el acceso al canal. Inicialmente, la fuente solicita transmitir a una tasa de 0,9 Mbps. En una red de 2 nodos, esto es posible sin afectar la congestión de la red. Sin embargo, cuando se tiene una ruta con 3 o más nodos, esta tasa de transmisión no es soportada eficientemente. Por lo tanto, la fuente debe ajustar su tasa de envío. Mientras que con AODV, la fuente envía paquetes a la tasa fija de 0,9 Mbps.

Como puede observarse en la Fig. 23c, el throughput global alcanzado con AQA-AODV es aproximadamente igual al logrado con AODV. Sin embargo, utilizando AQA-AODV, la congestión de la red es significativamente menor y por lo tanto, el tiempo que los paquetes esperan en cola y en tener acceso al canal disminuyen. En otras palabras, el esquema de tasa adaptativa de AQA-AODV permite una importante reducción de las pérdidas de los paquetes (ver Fig. 23b) y del retardo (ver Fig. 23d), sin sacrificar el ancho de banda.

### V.2.3 Topología móvil

Este escenario consiste de 30 nodos ubicados en un área de 1000m x 1000m y que se desplazan hacia posiciones aleatorias con una velocidad entre 0 y 3 m/s. Dos nodos fueron elegidos aleatoriamente como fuente y destino, el tiempo de simulación es de 300 segundos y la fuente solicita una tasa de transmisión que varía entre 0,1 y 1,0 Mbps.

Los resultados son mostrados en la Fig. 24 y se puede comprobar nuevamente una significativa reducción de los paquetes perdidos y del retardo en comparación con AODV. En cuanto a las pérdidas la diferencia entre los dos protocolos es de aprox. 70% y el retardo en AQA-AODV no supera los 0,5 segundos, lo cual corresponde a una reducción del 75% con respecto a AODV. Como se muestra en la Fig. 24c, existe un compromiso entre el throughput alcanzado y el porcentaje de paquetes perdidos, ya que para evitar las pérdidas por congestión y un mayor tiempo en las colas, es necesario reducir la tasa de transmisión, afectando directamente al throughput alcanzado en el nodo destino. Se espera que en escenarios de mayor movilidad, exista una mayor degradación del desempeño del protocolo de encaminamiento, debido a la movilidad de los nodos, ya que los nodos necesitan un tiempo determinado para intercambiar información sobre el estado de sus enlaces y para detectar cambios en la estructura de la red.

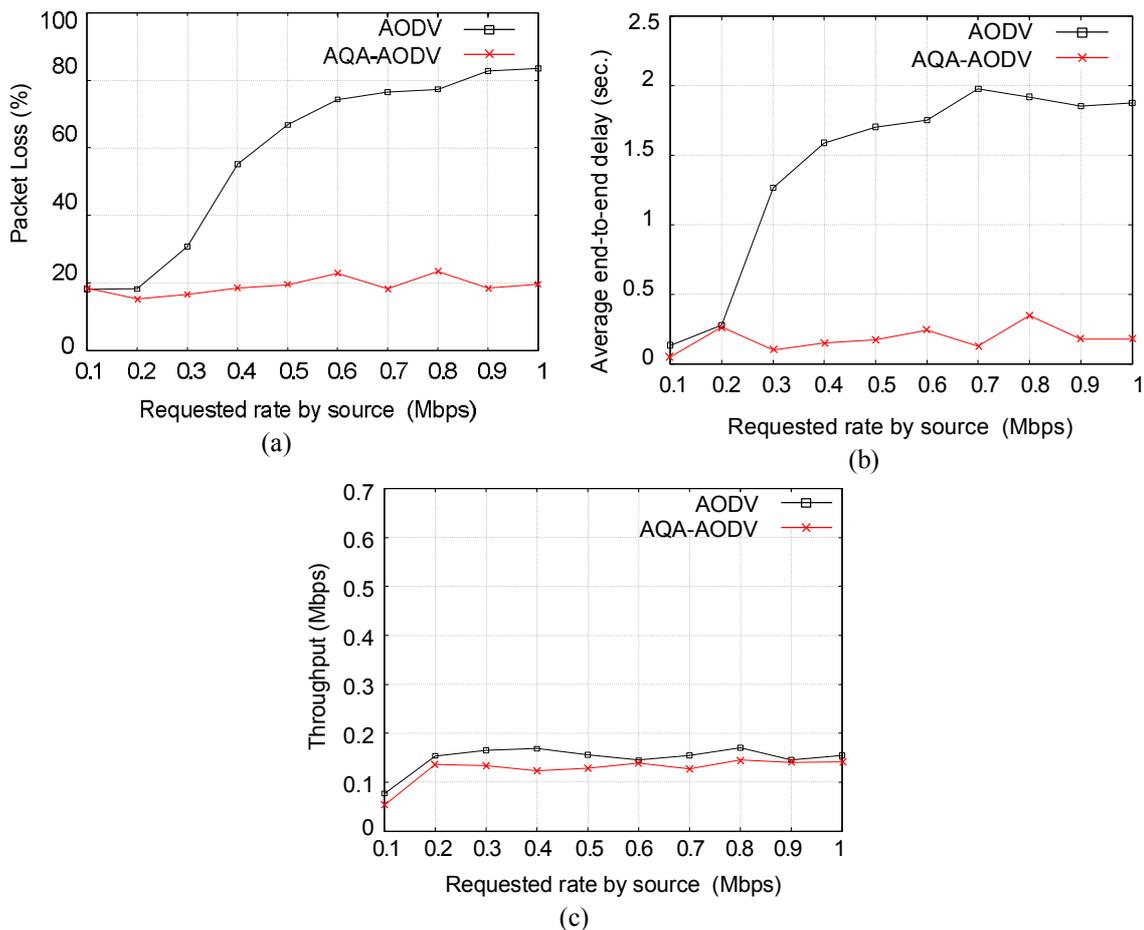


Fig. 24. (a) Porcentaje de paquetes perdidos, (b) retardo y (c) throughput alcanzado en una topología móvil

## VI. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

### VI.1. CONCLUSIONES

Incorporar mecanismos de calidad de servicio en el descubrimiento y mantenimiento de rutas y no solo a nivel de capa MAC, ha demostrado ser una estrategia importante para otorgar a las redes móviles ad hoc la capacidad de transportar de manera más eficiente el tráfico multimedia. Sin embargo, debido a las limitaciones que impone el dinamismo de los nodos, la ausencia de un control centralizado y las limitaciones del canal inalámbrico, hacen que no sea posible garantizar totalmente el cumplimiento de ciertos parámetros de calidad de servicio. En la actualidad, los protocolos de encaminamiento con QoS desarrollados, generalmente se basan en un esquema de control de admisión, que consiste en aceptar la transmisión de un flujo de tráfico, solamente si los nodos a lo largo de la ruta satisfacen los requerimientos (generalmente dados en términos de ancho de banda o retardo) impuestos por el nodo fuente. Sin embargo, es deseable por algunas aplicaciones conocer el estado de la red para adaptar su tasa de envío, por ejemplo algunas técnicas de compresión de vídeo.

En esta tesina se ha propuesto un nuevo protocolo de encaminamiento con calidad de servicio para soportar comunicaciones sensibles al retardo sobre redes inalámbricas ad hoc. Se ha denominado AQA-AODV (*Adaptive QoS-Aware – Ad hoc On-demand Distance Vector*) y está basado en uno de los protocolos bajo demanda (AODV) más utilizados en MANETs. Las principales modificaciones realizadas a AODV son: la implementación de un mecanismo de estimación de ancho de banda, modificación de los procedimientos de descubrimiento de rutas, modificación del formato de las tablas de enrutamiento y de la caché de vecinos, implementación de un agente cross-layer entre la capa de aplicación y la de red, modificación de los mensajes RREQ, RREP y RERR, implementación de una cache de sesiones y finalmente la implementación de un mecanismo de recuperación de rutas perdidas. Gracias a estas modificaciones, AQA-AODV puede evitar la congestión de la red mediante un sencillo y preciso algoritmo cross-layer con un esquema de realimentación adaptativo que provee información a la capa de aplicación del nodo fuente, acerca de la disponibilidad de recursos en la red. El protocolo propuesto, incorpora un mecanismo de estimación del ancho de banda que tiene en consideración la interferencia entre paquetes de un mismo flujo, también conocido como contienda intraflujo.

Los resultados de las simulaciones muestran que el desempeño de AQA-AODV en términos de retardo y pérdidas de paquetes es muy superior, comparado con AODV. Esto demuestra un uso eficiente del ancho de banda y una precisa predicción del ancho de banda consumido por parte del esquema de realimentación adaptativo. El esquema de recuperación de rutas, también provee buenos resultados en comparación con AODV, ya que las pérdidas de conexión debida la congestión en los nodos son evitadas en su mayoría. Además, la duración de estas caídas son también menores en AQA-AODV, por lo tanto se puede considerar como más eficiente para

transmisión de datos en tiempo real. Así pues, a partir de estos datos, se puede esperar resultados satisfactorios en la transmisión vídeo sobre redes ad hoc.

AQA-AODV y en general la mayoría de los protocolos de encaminamiento con QoS, tienen un mejor desempeño en escenarios donde la red tiene una baja movilidad, ya que los nodos necesitan un tiempo determinado para intercambiar información sobre el estado de sus enlaces y para detectar cambios en la estructura de la red.

## VI.2. LÍNEAS FUTURAS

Dentro del objetivo básico de garantizar que durante los procesos de encaminamiento sean tenidos en cuenta parámetros de calidad de servicio, algunos aspectos pueden ser optimizados en AQA-AODV. En este sentido se proponen tres puntos principales. El primero corresponde a la optimización del mecanismo de mantenimiento de rutas, donde es posible desarrollar un mecanismo que permita predecir la caída de los enlaces, para evitar degradación del desempeño en un ambiente móvil. Por esto, métodos como los expuestos en [29], pueden constituir una línea de trabajo a futuro que permita reducir el tiempo en encontrar una nueva ruta que satisfaga los requerimientos de QoS, después de una pérdida de conexión. En segundo lugar, en términos de métricas, solamente ha sido tenido en cuenta el ancho de banda en el momento de búsqueda de las rutas, podría implementarse otras métricas como el retardo o la energía de los nodos, como criterio en la selección de rutas. Y por último, es posible integrar en AQA-AODV un esquema de control de admisión, complementario al de realimentación adaptativa. De esta manera los nodos que no tengan la posibilidad de adaptar su tasa de transmisión, podrían negociar el establecimiento de sus rutas de acuerdo al ancho de banda solicitado.

Desde el punto de vista de la interacción con la capa MAC, se propone desarrollar pruebas del encaminamiento con QoS utilizando estándares como el IEEE 802.11e, en el cual se introduce un nuevo elemento llamado *Hybrid Coordination Function* (HCF) con dos tipos de acceso: *Enhanced Distributed Channel Access* (EDCA) y *Controlled Access* (HCCA). Además cuenta con funciones diseñadas para soportar diferenciación de tráfico, lo cual permitiría asignar diferentes prioridades al tráfico de encaminamiento y al de datos.

El principal objetivo de los futuros trabajos dentro de la línea del encaminamiento con QoS, es proveer un framework cross-layer donde las *video-aplicaciones* puedan aprovechar la información de realimentación proveniente del protocolo de encaminamiento (AQA-AODV) para ajustar un parámetro en la codificación fuente para adaptar el tráfico a las características de la ruta.

**REFERENCIAS**

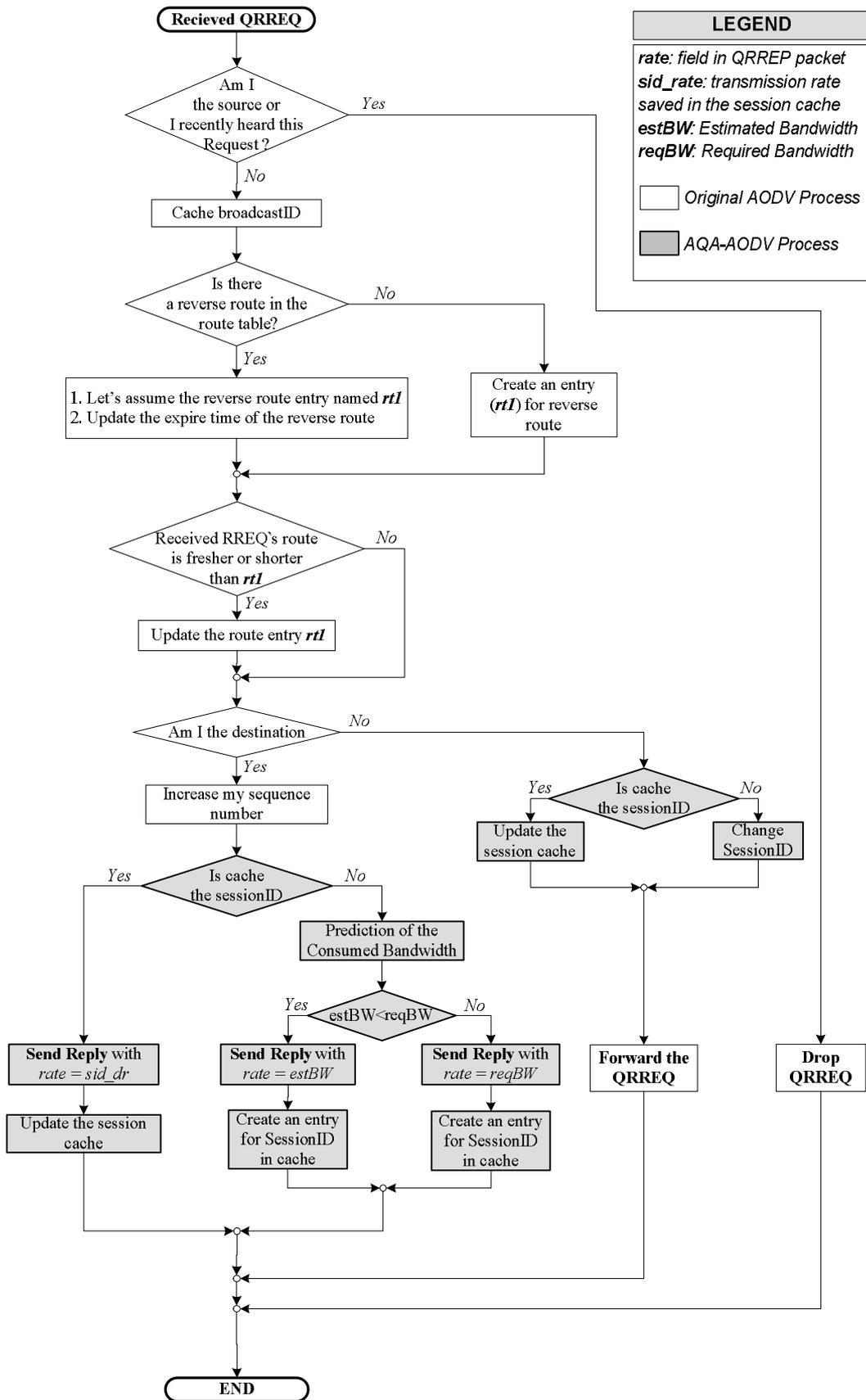
- [1] S.B. Lee, G.S. Ahn, X. Zhang, and A. Campbell. "INSIGNIA: An IP-Based Quality of Service Framework for Mobile Ad Hoc Networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*", 60(4):374–406, April 2000.
- [2] G.S. Ahn, A. Campbell, A. Veres, and L.H. Sun. "SWAN: Service Differentiation in Stateless Wireless Ad hoc Networks". In *IEEE INFOCOM*, New York, NY, June 2002.
- [3] C. Perkins and E.M. Royer, "Quality of service for ad hoc on-demand distance vector routing", IETF Draft. <http://www.psg.com/~charliep/txt/aodvid/qos.txt>, Oct. 2004.
- [4] H. Badis and K. A. Agha, "QOLSR, QoS Routing for Ad Hoc Wireless Networks using OLSR," *Wiley European Trans. Telecommunications*, vol. 15, no. 4, 2005, pp. 427–42.
- [5] C. Perkins, E.M. Royer and S. Das, "Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing," IETF RFC 3561, July 2003
- [6] T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized Link State Routing Protocol," RFC 3626, October 2003.
- [7] K. Sanzgiri, I. Chakeres, and E. Belding-Royer, "Determining intra-flow contention along multihop paths in wireless networks," in *Proc. Broadnets 2004 Wireless Netw. Symp.*, Oct. 2004, pp. 611–620.
- [8] J. Li, C. Blake, D. D. Couto, H. Lee, and R. Morris, "Capacity of ad hoc wireless networks," in *Proc. 7th ACM Int. Conf. Mobile Comput. Netw. (MobiCom'01)*, 2001, pp. 61–69.
- [9] H. Badis, A. Munaretto, K. A. Agha, and G. Pujolle, "Qos for ad hoc networking based on multiple-metric: Bandwidth and delay," in *IFIP/IEEE International Conference on Mobile and Wireless Communications Networks (MWCN)*, Oct. 2003.
- [10] R. Paoliello-Guimaraes and Llorenç Cerdá, Adaptive QoS Reservation Scheme for Ad-Hoc Networks, Third International Workshop of the EURO-NGI Network of Excellence, Sitges, Spain, June 6-9, 2006, Revised Selected Papers, Lecture Notes in Computer Science vol. 4396, Springer 2007, ISBN 978-3-540-70968-8, pp. 102 - 112.
- [11] R. de Renesse, V. Friderikos, H. Aghvami, "Towards Providing Adaptive Quality of Service in Mobile Ad-Hoc Networks", *IEEE VTC 2006*, Melbourne, May 2006.
- [12] C. E. Perkins and P. Bhagwat. "Highly dynamic destination sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers". In *Proc. ACM SIGCOMM '94*, pages 234-244, 1994.
- [13] S. Murthy J.J. Garcia-Luna-Aceves, A routing protocol for packet radio networks, in: *Proceedings of the First Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, Berkeley, CA, 1995, pp. 86–95.
- [14] M. Gerla, Fisheye state routing protocol (FSR) for ad hoc networks, Internet Draft, draft-ietf-manet-aodv-03.txt, work in progress, 2002.
- [15] D. Johnson, D. Maltz, J. Jetcheva, The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks, Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-07.txt, work in progress, 2002.
- [16] V.D. Park, M.S. Corson, A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks, in: *Proceedings of INFOCOM*, April 1997.
- [17] C. Toh, A novel distributed routing protocol to support ad-hoc mobile computing, in: *IEEE 15th Annual International Phoenix Conf.*, 1996, pp. 480–486.

- [18] M. Abolhasan and T. Wysocki. A review of routing protocols for mobile ad hoc networks. 2004. Disponible en internet en: <http://www.elseviercomputerscience.com>.
- [19] T. Bheemarjuna Reddy, I. Karthigeyan, B.S. Manoj, C. Siva Ram Murthy, Quality of service provisioning in ad hoc wireless networks: a survey of issues and solutions, *Ad Hoc Networks*, Volume 4, Issue 1, January 2006, Pages 83-124, ISSN 1570-8705.
- [20] S. Chen and K. Nahrstedt. A Distributed Quality-of-Service Routing in Ad-Hoc Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 17(8), August 1999.
- [21] C. Zhu and M. S. Corson. QoS routing for mobile ad hoc networks. Technical Report, Flarion Technologies, Bedminster, New Jersey 07921, 2002.
- [22] W.H. Liao, Y.C Tseng, S.L. Wang, and J.P. Sheu. A Multi-path QoS Routing Protocol in a Wireless Mobile ad Hoc Network. In *ICN '01: Proceedings of the First International Conference on Networking-Part 2*, pages 158-167, London, UK, 2001. Springer-Verlag.
- [23] C. R. Lin and J.-S. Liu. "QoS Routing in Ad Hoc Wireless Networks". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 17(8):1426-1438, August 1999.
- [24] S.H. Shah, K. Nahrstedt, Predictive location-based qos routing in mobile ad hoc networks, in: *Proceedings of IEEE ICC 2002*, vol. 2, May 2002, pp. 1022–1027.
- [25] Q. Xue and A. Ganz. "Ad hoc qos on-demand routing (aqor) in mobile ad hoc networks". *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 63(2):154–165, February 2003
- [26] L. Chen and W. B. Heinzelman. "QoS-Aware Routing Based on Bandwidth Estimation for Mobile Ad Hoc Networks". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(3):561-572, March 2005.
- [27] R. de Renesse, M. Ghassemian, V. Friderikos and A. H. Aghvami: "Qos Enabled Routing in Mobile Ad Hoc Networks", *Fifth IEEE International Conference on 3G Mobile Communication Technologies*, pp. 678-682 (2004).
- [28] Y. Zhang and T. Gulliver, "Quality of service for ad hoc on-demand distance vector routing," in *Proceedings of WiMob'2005*, vol. 3, Aug. 2005, pp. 192–196
- [29] T. Goff, N. B. Abu-Ghazaleh, D. S. Phatak, and R. Kahvecioglu, "Preemptive maintenance routing in ad hoc networks," in *Proc. MobiCom*, 2001, pp. 43–52.

**ANEXOS**

- Diagrama de flujo del procesamiento de un mensaje QRREQ
- Diagrama de flujo del procesamiento de un mensaje QRREP
- Publicación aceptada en congreso: Evaluation of a QoS-aware protocol with adaptive feedback scheme for Mobile Ad Hoc Networks. The Sixth International ICST Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness. QShine 2009.

**DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESAMIENTO DE UN MENSAJE QRREQ**



### DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESAMIENTO DE UN MENSAJE QRREP

