

Protocolos de enrutamiento aplicables a redes MANET

Lucy Coya Rey¹, Talia Odete Ledesma Quiñones², Walter Baluja García³

¹CITI, Ingeniera en Telecomunicaciones y Electrónica lucy.cr@udio.cujae.edu.cu

²CITI, Ingeniera en Telecomunicaciones y Electrónica talia.lq@udio.cujae.edu.cu

³ISPJAE, Doctor en Ciencias walter@tesla.cujae.edu.cu

RESUMEN

Las redes MANET (*Mobile Ad hoc Networks*) presentan características distintivas (movilidad y autonomía energética de los nodos, entre otras) que fuerzan una selección cuidadosa del protocolo de enrutamiento a emplear en ellas. Los protocolos de enrutamiento tienen como objetivo encontrar la mejor ruta para la comunicación entre dos nodos. Existe un gran número de protocolos de enrutamiento aplicables a redes MANET, cada uno de los cuales emplea determinadas métricas para la selección del trayecto óptimo. El presente artículo ofrece un breve estudio comparativo de estos protocolos según una serie de parámetros de interés, lo cual permitirá definir cuál de ellos se ajusta mejor a determinados escenarios.

Palabras claves: características, métricas, protocolos de enrutamiento, redes MANET, trayecto óptimo

ABSTRACT

MANETs (Mobile Ad hoc Networks) have distinctive features (mobility and energy autonomy of the nodes, among others) that force a careful selection of the routing protocol to be used. Routing protocols aim to find the best route for communication between two nodes. There are a lot of routing protocols that can be used on MANETs, each of which uses certain metrics for selecting the optimal path. This article provides a brief comparative study of these protocols according to a set of parameters of interest that will help to define which of them is best suited in certain scenarios.

Key words: features, MANETs, metrics, optimal path, routing protocols

INTRODUCCIÓN

Una red *ad hoc* es una colección de nodos móviles inalámbricos que conforman una red temporal sin una administración centralizada. Las redes MANET (*Mobile Ad hoc NETWORKS*) son redes inalámbricas multi-salto auto-configuradas y auto-organizadas, en las cuáles la estructura de la red cambia dinámicamente debido a la movilidad de los nodos. Los protocolos de enrutamiento cuyo objetivo es encontrar el mejor camino entre la fuente y el destino en una comunicación han sido ampliamente utilizados en redes multi-salto. Las funciones elementales que realiza un protocolo de este tipo consisten en el descubrimiento de rutas de encaminamiento, la selección de la ruta óptima y la actualización del estado de esta. Para descubrir el conjunto de posibles rutas de encaminamiento, el protocolo de enrutamiento utiliza mecanismos de recolección de información que le permiten determinar los puntos intermedios por donde podrá viajar la paquetería desde un nodo fuente hasta el destino. Las métricas constituyen parámetros de desempeño que el protocolo de enrutamiento utilizará en la selección de las rutas. Estas pueden basarse en la minimización del retardo y de las pérdidas, o bien en la maximización del *throughput*, entre otras. Finalmente, el proceso de mantenimiento de la ruta seleccionada monitoriza el estado de la trayectoria de comunicación y reacciona de manera oportuna ante una eventual dificultad en la misma. La forma en la que cada protocolo resuelve el problema del encaminamiento difiere en virtud del algoritmo que cada protocolo ejecute. Gran parte de los protocolos de enrutamiento han sido diseñados con base en dos clases importantes de algoritmos: estado de enlace y vector-distancia, aunque existen otros [1].

ALGORITMOS DE ENRUTAMIENTO

En el caso de la arquitectura TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*), esta tarea está confiada al nivel de red, en el cual se implementan los denominados algoritmos de enrutamiento, responsables de la determinación del camino seguido por cada paquete hasta alcanzar al destino. Existen diversos algoritmos de enrutamiento, aquellos más utilizados son: Estado de enlace, Vector-Distancia y *Source Routing* [2]:

- ✓ **Algoritmo de Estado de Enlace:** se asigna un costo a cada enlace o conexión y cada nodo administra un mapa completo de la topología de la red. Periódicamente cada nodo difunde el costo de los enlaces a los cuales está conectado, y los restantes nodos actualizan el mapa de la red y la tabla de enrutamiento, aplicando un algoritmo que tiene en cuenta el camino a menor costo.
- ✓ **Algoritmo Vector-Distancia:** el nodo conoce ya el costo de los enlaces a los que está conectado. Cada nodo comunica a su vecino qué otros nodos puede alcanzar y a qué costo. Así cada nodo recalcula su propia tabla de enrutamiento siguiendo las informaciones que ha recibido, y utilizando un algoritmo que tiene en cuenta el camino a menor costo.
- ✓ **Source Routing:** las decisiones pertinentes al enrutamiento vienen tomadas desde la fuente y los paquetes siguen un camino ya establecido.

Estos algoritmos constituyen la base de los protocolos de enrutamiento aplicables en redes móviles *ad hoc*.

MÉTRICAS DE ENRUTAMIENTO APLICABLES EN REDES MÓVILES AD HOC

Existe un gran número de métricas que pueden ser utilizadas para el enrutamiento de paquetes en redes móviles *ad hoc* o en redes malladas. Las métricas son parámetros de comparación que posibilitarán la elección de la ruta más conveniente para la transmisión de los datos. Las más utilizadas son las métricas basadas en la topología de la red y aquellas que se basan en la utilización de mediciones de sondeo activo, algunas de las cuales se describen a continuación.

✓ **Número de saltos**

Su facilidad de implementación ha hecho que sea la métrica más utilizada en cualquier tipo de red. Cada enlace cuenta como una unidad, y el peso del trayecto es igual al número total de *routers* que se encuentren en este. El fundamento para minimizar la métrica del número de saltos es sencillo. Menos saltos en la ruta de datos deben implicar una menor demora, un mayor *throughput* y menos desperdicio de recursos de red [3].

✓ **Round Trip Time (RTT) por Salto**

Esta métrica refleja la demora bidireccional en un enlace. Para poder medir el RTT, se envía periódicamente a cada nodo vecino un paquete de sondeo con un valor de *timestamp*, el cual cada nodo retorna inmediatamente. Esta respuesta posibilita que el nodo emisor calcule el valor de RTT. La métrica de trayecto RTT es simplemente la suma de cada uno de los valores de RTT estimados en cada enlace de la ruta. Esta es una métrica dependiente de la carga, ya que abarca las colas, la contención del canal y las demoras de retransmisión. Además de la sobrecarga de la red relacionada al envío de paquetes de sondeo, la desventaja de emplear RTT como métrica de enrutamiento es que puede llevar a una inestabilidad de la ruta (fenómeno de auto-interferencia) [3].

✓ **ETX (Expected Transmission Count)**

Esta métrica fue especialmente diseñada para redes MANET y es una de las pocas que se han implementado en la práctica. ETX estima el número requerido de transmisiones (incluyendo las retransmisiones) para enviar un paquete a través de un enlace. Minimizar el número de transmisiones no solo optimiza el *throughput* general de la red, sino que también minimiza el consumo total de energía y la interferencia resultante. Si df es la razón de entrega de paquetes hacia adelante y dr la razón de entrega en reversa (por ejemplo, la probabilidad de que la confirmación de un paquete sea transmitida satisfactoriamente), entonces la probabilidad de que un paquete arribe y sea confirmado correctamente es $df \times dr$, quedando definida la métrica ETX como [3]:

$$ETX = \frac{1}{df \times dr}$$

Las razones de entrega son calculadas utilizando paquetes de sondeo de capa de enlace enviados por difusión. El valor de ETX para una ruta se define como la suma de los valores de las métricas de los enlaces que conforman esa ruta. Las principales ventajas de la métrica ETX son su independencia con respecto a la carga del enlace (inmune al fenómeno de auto-interferencia) y que toma en cuenta los enlaces asimétricos. Las desventajas esenciales de la métrica ETX es la sobrecarga de la red debido a la transmisión de los paquetes de sondeo y que esta sólo es relevante para las interfaces de radio que realizan retransmisiones [3].

✓ **ETT (*Expected Transmission Time*) y WCETT (*Weighted Cumulative Expected Transmission Time*)**

La métrica ETX no es óptima bajo algunas circunstancias, por ejemplo, ETX preferirá enlaces altamente congestionados a enlaces libres si la razón de pérdida de paquetes de los enlaces congestionados es menor que la de los enlaces libres, y esto no es deseable. Para afrontar esta dificultad se propuso la métrica ETT, que incorpora el *throughput* a sus cálculos. Esta métrica depende del tamaño del paquete de sondeo, del ancho de banda medido en un enlace y de la propia métrica ETX [3].

Como muchas tecnologías inalámbricas, incluyendo WiFi, proveen múltiples canales sin solapamiento, se ha propuesto una adaptación de la métrica que toma en cuenta el uso de múltiples canales, denominada *Weighted Cumulative ETT* (WCETT). Esta métrica utiliza un parámetro ajustable para balancear los pesos, y un número que representa el número de veces que el canal es utilizado o se ha experimentado interferencia intra-flujo en ese canal. WCETT define un menor costo para las rutas que utilizan canales más diversificados con menos interferencia intra-flujo [3].

✓ **MIC (*Metric of Interference and Channel switching*)**

La métrica MIC supera a la métrica WCETT al abordar el problema de las interferencias intra-flujo e inter-flujo. Está basada en el valor mínimo de ETT en la red, el uso de la interfaz de radio y el costo de la conmutación de canal. MIC depende específicamente de los parámetros IRU (*Interference-aware Resource Usage*) y CSC (*Channel Switching Cost*). La métrica MIC provee un mejor rendimiento debido a que considera las interferencias intra y extra-flujo y la diversidad de canal. La principal desventaja es la elevada sobrecarga que se necesita para estimar el valor de la métrica para cada ruta. Otras desventajas son que cada nodo debe conocer el total de nodos en la red, lo que puede ser muy costoso en redes de gran tamaño, y que el rango de interferencia es siempre mucho mayor que el rango de transmisión[3].

CLASIFICACIÓN DE LOS PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO

Los protocolos de enrutamiento aplicables a redes inalámbricas móviles *ad hoc* se pueden clasificar según varios parámetros o características. La clasificación más utilizada es aquella basada en la forma en que se descubren y seleccionan las rutas. Atendiendo a esto los protocolos de enrutamiento pueden ser [4]:

✓ **Proactivos:** periódicamente se emiten paquetes utilizados para descubrir nuevos nodos en la red y la ruta hacia ellos, presuponiendo que en algún momento dichas rutas serán necesarias y utilizadas. Se utiliza una tabla para mantener actualizadas todas las rutas. La ventaja fundamental de los protocolos proactivos es el hecho de que los nodos pueden obtener información de enrutamiento fácilmente y establecer una sesión de manera sencilla. Entre las desventajas se encuentran la existencia de mucha información en los nodos para el mantenimiento de las rutas y que esta información es lenta de actualizar cuando existe un fallo en algún enlace.

✓ **Reactivos:** buscan las rutas cuando se necesitan, mediante la inundación (*flooding*) de la red de paquetes de solicitud de ruta. Cuando un nodo desea encontrar un trayecto hacia un nodo destino, debe iniciar un proceso de descubrimiento de ruta. Una vez se halla el camino adecuado, este se mantiene hasta que el destino se vuelve inaccesible o la ruta ya no es requerida. Esto limita el número total de destinos para el cual la información del enrutamiento se mantiene y por consiguiente se reduce el tamaño de las tablas de enrutamiento. Las desventajas de los protocolos reactivos son la significativa latencia en el proceso de descubrimiento, la posibilidad de saturación de la red debido a la técnica de *flooding* y la menor calidad de las rutas.

- ✓ **Híbridos:** Combinan elementos proactivos y reactivos. En los protocolos de enrutamiento híbridos se lleva a cabo de forma simultánea el enrutamiento intradominio e interdominio. El enrutamiento proactivo se aplica para la comunicación a nivel del dominio y el enrutamiento reactivo se utiliza para la comunicación entre los diferentes dominios.

También los protocolos de enrutamiento pueden clasificarse atendiendo al nivel en donde desarrolla su funcionamiento en el modelo OSI (*Open System Interconnection*), en protocolos de Nivel 2 (capa de enlace de datos) o en protocolos de Nivel 3 (capa de red). Otra posible clasificación de los protocolos de enrutamiento sería en dependencia de la información que cada nodo tiene sobre la topología de la red, si esta es parcial o total. Otros criterios que también son considerados para clasificar los protocolos de enrutamiento aunque son menos utilizados son la organización de la red, el conocimiento de la posición y la gestión de la movilidad [4].

PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO APLICABLES EN REDES MÓVILES AD HOC

Las redes móviles *ad hoc* son redes no estructuradas, por lo tanto los protocolos de enrutamiento que se empleen en ellas deben tomar en cuenta aspectos tales como la movilidad, los cambios dinámicos en la topología y la poca confiabilidad del medio. En una red de este tipo los nodos se comunican entre sí y establecen rutas hacia nodos fuera de su vecindad, y son los protocolos de enrutamiento los responsables del descubrimiento, establecimiento y mantenimiento de dichas rutas [5]. A continuación se describen brevemente algunos de los protocolos de enrutamiento aplicables a redes móviles *ad hoc*.

Protocolos de enrutamiento proactivos

Los protocolos de enrutamiento proactivos suelen ser muy utilizados en redes de pequeño tamaño y en redes con una alta densidad de tráfico, debido a la ventaja que representa el intercambio continuo de información topológica que realizan [5]. Existen varios protocolos proactivos que pueden emplearse en redes móviles *ad hoc*, entre los cuales se encuentran DSDV (*Destination Sequence Distance Vector*) [6], CGSR (*Cluster Head Gateway Switch Routing*) [7], OLSR (*Optimized Link State Routing*), *Scalable Routing* mediante el protocolo HEAT [8], BATMAN (*Better Approach to Mobile Ad hoc Networking*), DREAM (*Distance Routing Effect Algorithm for Mobility*) [9], entre otros. A continuación se explican con mayor profundidad OLSR y BATMAN.

- **OLSR (*Optimized Link State Routing*)**

OLSR es un protocolo de enrutamiento proactivo [9], que hereda la estabilidad del algoritmo de estado de enlace. El protocolo reduce el tamaño de los paquetes de control, ya que en lugar de declarar todos los enlaces de un nodo con sus nodos vecinos, declara solamente un conjunto de estos denominados *Multipoint Relay Selectors*. También utiliza únicamente nodos seleccionados (*Multipoint Relays*, MPRs) para difundir los paquetes en la red. Este conjunto de nodos MPR se selecciona de entre los vecinos de un salto con los cuales debe tener un enlace bidireccional, de manera que este cubra (en términos de alcance de radio) a todos los nodos que se encuentren a una distancia de dos saltos, además puede cambiar con el tiempo. Mientras más pequeño sea el conjunto de MPRs, más óptimo será el protocolo de enrutamiento. Solo los MPRs de un nodo retransmiten los mensajes de difusión que este envía, reduciéndose significativamente el número de retransmisiones en un proceso de *flooding* o *broadcast*. El protocolo OLSR calcula sus rutas a todos los destinos conocidos a través de estos nodos MPR. Al ser un protocolo proactivo OLSR mantiene las rutas para todos los destinos en la red, lo que constituye una

ventaja ya que no existe el retardo asociado con la búsqueda de una nueva ruta, y está diseñado para trabajar de forma completamente distribuida, no requiere de confiabilidad para la transmisión de los mensajes de control, y tampoco requiere una entrega ordenada de sus mensajes. OLSR soporta una movilidad nodal que puede ser seguida a través de sus mensajes de control locales, y que depende de la frecuencia de envío de estos [10, 11].

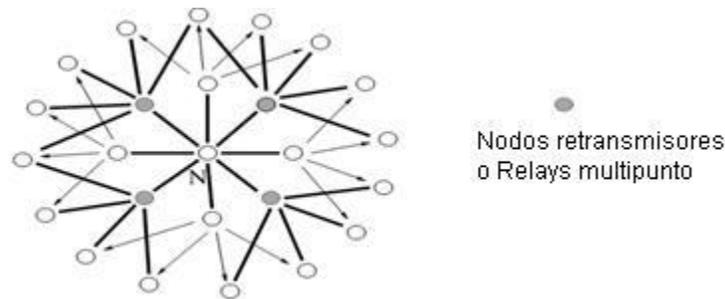


Figura 1. Relays multipunto en OLSR [11].

Otra ventaja de OLSR es que las rutas de red y las rutas por defecto pueden agregarse al sistema mediante los mensajes HNA (*Host and Network Association*), lo que posibilita la conexión a Internet o a otras redes. Entre las desventajas pudiera mencionarse que la definición original de OLSR simplemente asume que un enlace está activo si de este se ha recibido recientemente un determinado número de paquetes HELLO. Esto supone que los enlaces son bi-modales (funcionando o fallido), que no es necesariamente el caso en redes inalámbricas, donde los enlaces a menudo exhiben tasas intermedias de pérdida de paquetes. Además, al ser un protocolo de estado de enlace, OLSR requiere una cantidad razonablemente grande de ancho de banda y potencia de CPU (*Central Processing Unit*) para calcular las rutas óptimas en la red, lo que pudiera constituir también una desventaja en redes de gran tamaño [12].

- **BATMAN (Better Approach to Mobile Ad hoc Networking)**

BATMAN es un protocolo de enrutamiento cada vez más popular en las redes inalámbricas móviles *ad hoc*, y producto de esta popularidad ha sido llevado al kernel de Linux. La motivación en el desarrollo de BATMAN era remplazar el protocolo OLSR, debido a las dificultades inherentes a este. BATMAN solo conoce el siguiente salto a diferencia de OLSR que mantiene las rutas para todos los vecinos de la red. Los mensajes de enrutamiento que se envían en el protocolo BATMAN se denominan *Originator Messages* (OGMs), y son paquetes UDP (*User Datagram Protocol*) de 52 bytes de longitud. El campo más importante de estos mensajes es el campo *Originator Address*, que contiene la dirección de *host* del nodo emisor. Cuando otro nodo recibe este mensaje, comprueba si la dirección del originador y la dirección fuente de la cabecera IP coinciden, y en caso afirmativo los dos nodos son vecinos directos. Todos los OGMs dentro de la red BATMAN son difundidos y re-difundidos por los nodos de la red hasta que el valor del campo TTL (*Time To Live*) sea cero, hasta que se hayan perdido los paquetes, o hasta que el nodo recibe un OGM que él mismo ha enviado previamente. Todos los nodos conocerán de la existencia de los demás y qué nodos constituyen el primer salto entre ellos y el resto de los nodos de la red, es decir, el primer salto de la ruta. Los nodos y los primeros saltos en sus trayectos se almacenan en una lista llamada *Originator List* [13, 14]. Existen dos versiones completamente diferentes del protocolo de enrutamiento BATMAN, y el descrito anteriormente es el BATMAN Daemon o batmand, que es un protocolo de capa de red. Sin embargo, existe una versión más reciente del protocolo denominada BATMAN Advanced o batman-adv.

BATMAN Advanced es una implementación de BATMAN en forma de módulo del kernel de Linux que opera en capa 2 (capa de enlace). En este la información de enrutamiento es transportada utilizando las tramas (Ethernet, Wi-Fi, entre otras variantes en dependencia de la tecnología que se emplee), y además el tráfico de datos es manejado por batman-adv. Batman-adv encapsula y envía todo el tráfico hasta que este arribe al destino, emulando el funcionamiento de un *switch* de red virtual de los nodos participantes. De esta forma todos los nodos aparentan ser de enlace local y desconocen la topología de la red, además de no verse afectados por algún cambio en esta. Para la configuración y la depuración del módulo batman-adv, fue desarrollada la herramienta batctl (BATMAN Control). Esta ofrece una interfaz conveniente para la configuración del módulo y la información de estado. Además contiene versiones de capa 2 de los comandos ping, traceroute y tcpdump, debido a que el *switch* de red virtual es completamente transparente a todos los protocolos de capas superiores. Entre las principales ventajas de BATMAN Advanced pudieran mencionarse que sobre él puede ejecutarse cualquier protocolo (IPv4, IPv6, DHCP *Dynamic Host Configuration Protocol*, entre otros), y que los nodos pueden formar parte de la red móvil *ad hoc* aún sin tener dirección IP [13].

Protocolos de enrutamiento reactivos

Los protocolos de enrutamiento reactivos se ajustan mejor a redes con una baja densidad de nodos y patrones de tráfico estáticos, y son preferidos en redes con una alta movilidad [5]. Entre los principales protocolos reactivos se encuentran AODV (*Ad hoc On Demand distance Vector routing*), DSR (*Dynamic Source Routing*), TORA (*Temporally Ordered Routing Algorithm*) [15], LQSR (*Link Quality Source Routing*) [16], entre otros. Se explican brevemente a continuación los protocolos AODV y DSR.

- **AODV (*Ad hoc On demand Distance Vector routing*)**

AODV es un protocolo creado sobre la base del protocolo DSDV, y constituye un algoritmo de adquisición de rutas puramente bajo demanda. Una característica fundamental del protocolo AODV es que los nodos destino de un trayecto, antes de proporcionar información de enrutamiento, crean un número de secuencia de destino (*destination sequence number*), que constituye un instrumento para evaluar cuánto se ha actualizado determinada ruta evitando la formación de lazos. Un nodo que deba elegir entre varios caminos hacia un cierto destino, elegirá aquel caracterizado por un número de secuencia mayor, correspondiente a una información de enrutamiento más reciente. Además, el protocolo soporta el enrutamiento multidifusión (*multicast*). Cuando un nodo desea enviar un dato, primeramente busca la ruta destino en su caché de rutas. Si esta existe se envían los datos, de lo contrario el nodo difunde un *Route Request Packet* (RREQ) a sus vecinos hasta que se llegue al destino. El RREQ contiene la dirección de origen, la dirección de destino, el número de secuencia de origen, el identificador de difusión, y el más reciente número de secuencia de los nodos fuente y destino. Cuando la solicitud llega al destino, una respuesta (RREP *Route Reply*) es enviada de vuelta al nodo de origen a través de la ruta de la cual el destino recibió primero el paquete RREQ. De esta forma el protocolo de enrutamiento AODV encuentra la ruta más rápida y más corta. Los nodos de la red que forman parte de rutas activas, pueden transmitir periódicamente mensajes especiales de RREP, llamados mensajes "HELLO", a sus nodos vecinos. La no recepción de mensajes de tipo "HELLO" provenientes de determinado nodo vecino se interpretará como pérdida de la conexión con este, y el resto de los nodos de la red procederán a corregir su tabla de enrutamiento eliminando aquel trayecto [17, 18].

Las principales ventajas de AODV son que no crea tráfico adicional para la comunicación y que no necesita de mucho espacio para el almacenamiento de los datos. También tiene algunas limitaciones, ya que necesita más tiempo para establecer una conexión y la comunicación inicial para establecer una

ruta es más complicada que en otros protocolos. Además consume una inusual cantidad de ancho de banda debido al envío periódico de tramas de tipo HELLO [17].

- **DSR (*Dynamic Source Routing*)**

El protocolo DSR es un protocolo que se basa en el enrutamiento de origen. En este protocolo cada nodo tiene una memoria caché local para almacenar la información de enrutamiento. La estructura central de datos para cada nodo que utilice DSR es la caché de rutas, la cual contiene el conocimiento del nodo de la topología actual de la red. La especificación del protocolo sugiere dos posibles implementaciones para la caché de rutas: la caché de trayecto, en la cual cada nodo almacena cada ruta a partir de sí mismo hacia otro nodo, y la caché de enlace en la cual el nodo añade un enlace a un gráfico, el cual representa la visión del nodo de la topología de red. Los enlaces obtenidos de diferentes rutas pueden formar nuevas rutas, por lo tanto la caché de enlace proporciona más información de enrutamiento que la caché de trayecto [17].

DSR funciona en dos fases que operan enteramente bajo demanda [17, 18]:

- ✓ **Descubrimiento de ruta:** Durante este proceso, el nodo de origen observa la caché de rutas en busca de un trayecto hacia el destino, y de existir esta envía los datos, de lo contrario difunde un paquete RREQ a sus vecinos hasta que se alcanza el destino. Cuando la solicitud llega al destino, una respuesta de ruta RREP es enviada de vuelta al nodo de origen a través de la ruta registrada que tiene el menor número de saltos.
- ✓ **Mantenimiento de ruta:** En el proceso de mantenimiento de las rutas, un nodo es capaz de detectar (mientras utiliza una ruta hacia el destino), si la topología de red ha cambiado de tal modo que ya no pueda utilizar este trayecto debido a que un enlace ha dejado de funcionar. Cuando se indica que la ruta hacia el destino ha dejado de ser viable, el nodo puede intentar utilizar cualquier otro trayecto conocido, o puede invocar el proceso de descubrimiento de ruta para encontrar una nueva. El mantenimiento de ruta se utiliza solo cuando el nodo realmente envía paquetes al destino.

DSR tiene un mejor desempeño en un entorno estático o de baja movilidad. Algunas de las desventajas del protocolo son que el mecanismo de mantenimiento de las rutas no repara localmente un enlace dañado, que la demora del proceso de establecimiento de la conexión es mayor que en los protocolos basados en tablas y que la sobrecarga de enrutamiento es directamente proporcional al tamaño del trayecto [17].

Protocolos de enrutamiento híbridos

Los protocolos de enrutamiento híbridos son preferidos en redes de gran tamaño donde hay una gran cantidad de nodos. La mayoría de los protocolos de este tipo están basados en zonas, donde el enrutamiento dentro de la zona se realiza de manera proactiva y fuera de esta de manera reactiva. Existen varios protocolos muy utilizados entre los que se encuentran: ZRP (*Zone Based Routing Protocol*), SHARP (*Sharp Hybrid Adaptive Routing Protocol*) [19], ZHLS (*Zone-based Hierarchical Link State*) [20], SLURP (*Scalable Location Update Routing Protocol*) [20], DDR (*Distributed Dynamic Routing*) [20], entre otros. A continuación se describe el protocolo híbrido ZRP.

ZRP (*Zone Based Routing Protocol*)

ZRP es un protocolo híbrido, que aprovecha lo mejor de los protocolos proactivos y reactivos. La vecindad local de un nodo es lo que se conoce como zona de enrutamiento. Para construir una zona de enrutamiento el nodo tiene que identificar a todos sus vecinos que se encuentran a la distancia de un salto y a los cuales puede llegar directamente. El proceso de descubrimiento de vecinos es administrado

por el protocolo *Neighbor Discovery Protocol* (NDP), que se encarga además de ofrecer información sobre los fallos en los enlaces. Un paquete de tipo *beacon* denominado "HELLO" se transmite en un intervalo fijado por el protocolo NDP, y cuando los nodos lo reciben modifican sus tablas de rutas [17, 18]. El tamaño de la zona de enrutamiento en el protocolo ZRP no está determinado por mediciones geográficas, sino por un radio de longitud ρ , donde ρ es el número de saltos desde un nodo i hacia la frontera de la zona. Cada nodo puede seleccionar diferentes radios de zonas, en dependencia de la potencia de la señal, la potencia de transmisión, la velocidad de transmisión, entre otros parámetros. Para que el protocolo ZRP funcione de manera correcta es importante que el radio de la zona sea adecuado al tipo de red en cuestión. Se recomiendan radios pequeños para redes densas compuestas de grupos con pocos nodos que se mueven rápidamente, y radios mayores para redes dispersas de nodos con movilidad más baja. La Figura 2 muestra un ejemplo de zona de enrutamiento con $\rho=2$ [21].

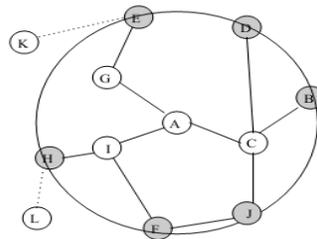


Figura 2. Zona de enrutamiento del nodo A con $\rho=2$ [21].

ZRP utiliza dos métodos de enrutamiento: *Intra-Zone Routing Protocol* (IARP) e *Inter-Zone Routing Protocol* (IERP). IARP es responsable de mantener las rutas a todos los destinos dentro de la zona de enrutamiento de forma proactiva. IERP es responsable de descubrir y mantener las rutas a los nodos fuera de la zona de enrutamiento de forma reactiva. Si dentro de una zona se encuentran tanto la fuente como el destino de un paquete, la entrega de este se podrá realizar de forma inmediata. ZRP puede ser utilizado para controlar la sobrecarga de la red y para disminuir la latencia provocada por el descubrimiento de rutas, lo que constituye una gran ventaja. Además, variando el radio de la zona de enrutamiento puede mejorarse el rendimiento del protocolo. La principal desventaja del protocolo radica en que en ausencia de un controlador de solicitudes, tiende a producir una mayor sobrecarga de tráfico de control que otros protocolos [17, 18].

BREVE COMPARATIVA DE PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO PARA REDES MANET

Si bien todos los protocolos analizados con anterioridad (y algunos otros) pueden ser utilizados en redes móviles *ad hoc*, es preciso realizar una comparación de las principales características de estos para ganar en criterios de selección en función de escoger el que mejor se adapta a la red que se desee implementar. Los parámetros que se utilizan para realizar la comparación son los siguientes:

- **Métricas de enrutamiento:** Parámetros que determinan la selección de las rutas.
- **Libre de lazos:** Define si el protocolo es capaz de evitar la ocurrencia de lazos en la red.
- **Escalabilidad:** Define si el protocolo permite la inserción de nuevos nodos en la red sin que se afecte su rendimiento.
- **Confiabilidad:** Define si el protocolo garantiza la entrega de la información a su respectivo destino.
- **Balance de carga:** Proceso de distribuir la carga y el tráfico uniformemente en la red para evitar sobrecargas.

- **Control de congestión:** Proceso de asignación de los recursos en la red, de manera que esta pueda operar a un nivel de rendimiento aceptable cuando la demanda excede o es cercana a la capacidad de sus recursos. Algunos de estos recursos son el ancho de banda de los enlaces, el espacio en memoria, la capacidad de procesamiento, entre otros.
- **Throughput:** Razón promedio de entregas exitosas de paquetes en un canal de comunicación.
- **Implementación:** Desarrollo de versiones de los protocolos para plataformas de computadoras o de otros dispositivos de comunicación.

En la Tabla 1 se resumen las características de los protocolos de enrutamiento explicados en el artículo. Si bien todos los protocolos de enrutamiento analizados son válidos para redes móviles *ad hoc*, el rendimiento de varios de ellos, se ve afectado a medida que el nivel de movilidad de los nodos se incrementa. En [22] se realiza un estudio comparativo de los protocolos OLSR, AODV y DSR en diferentes escenarios estáticos. Los resultados arrojaron que en redes inalámbricas *ad hoc* malladas estáticas tanto de pequeño, mediano o gran tamaño, el protocolo OLSR presentaba un mejor rendimiento, una menor demora extremo a extremo y menor sobrecarga de la red con respecto a AODV y DSR pese a ser un protocolo proactivo, debido a que no hay movilidad en la red. Sin embargo, en el artículo [23] se describe cómo para redes inalámbricas malladas igualmente estáticas, el protocolo BATMAN es capaz de superar a OLSR en prácticamente todas las métricas de rendimiento analizadas, aunque sin llegar a significar una diferencia abismal. Otro estudio realizado en [24] analiza los protocolos AODV, DSR y ZRP. Las simulaciones arrojaron como resultados que AODV supera al resto en cuanto a sobrecarga de la red, la demora y el *throughput*. En [25] se estudian los protocolos DSR, AODV y OLSR. Una vez más se obtiene como resultado que la sobrecarga y la demora son bajas en OLSR cuando existen pocos nodos en la red, por lo que este es un protocolo que puede ser utilizado en redes de pequeño tamaño. AODV tiene un mejor rendimiento que DSR, y son factibles de emplear en redes de mayor tamaño.

Tabla 1. Comparación entre los protocolos de enrutamiento aplicables en redes móviles *ad hoc*.

Protocolo	Métrica más utilizada	Libre de lazos	Escalabilidad	Confiabilidad	Balance de carga	Control de congestión	Throughput	Implementación
OLSR [18]	Salto (camino más corto)	Sí	No	Sí	No	No	Disminuye con la movilidad	Linux [26] Android (OLSR Mesh Tether, MANET Manager) [27, 28] NS-3 [29]
BATMAN	TQ <i>Transmission Quality</i> [30] (Paquetes OGM)	Sí [31]	Depende de la pérdida de paquetes [32]	Sí [33]	No [34]	Sí [33]	Disminuye con la movilidad [35]	Linux (Ubuntu) [36] Android [37] NS-3 [38]
AODV [18]	Salto (camino más corto y más rápido)	Sí	No	Sí	No	Sí	Disminuye con la movilidad	NS-3 [29] C++ [39] Matlab [40] Linux [41]
DSR [18]	Salto (camino más corto)	Sí	No	Sí	No	Sí	Disminuye con la movilidad	NS-3 [29] Linux [42]
ZRP	Salto (zonas) (camino más corto)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	NS-2 [43] Linux [44]

CONCLUSIONES.

En este artículo se realizó un estudio de los protocolos de enrutamiento que son aplicables a las redes móviles *ad hoc*. Se definieron los principales algoritmos de enrutamiento existentes así como las métricas de enrutamiento más utilizadas para la conformación de las rutas. Se ofreció una descripción breve de algunos de los protocolos más utilizados clasificándolos en proactivos, reactivos e híbridos, los cuales fueron: OLSR, BATMAN, AODV, DSR, y ZRP. Se presenta una breve comparativa entre los mismos, teniendo en cuenta una serie de parámetros que pueden ser útiles en el momento de seleccionar alguno de estos protocolos para la implementación de red una MANET.

REFERENCIAS.

1. **Carrillo Arellano, Carlos Ernesto**, (2011), "*Análisis de protocolos de encaminamiento para redes inalámbricas tipo malla en modo infraestructura*" (en Español), Tesis de Maestría, Master en Ciencias en Tecnologías de la Información, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Disponible en: http://pcyti.izt.uam.mx/archivos/Tesis/Generacion2009/ICR_ErnestoCarrillo.pdf, p. 74. (Thesis)
2. **Sterbenz, James P. G.**, (2009), "*MANET Routing*", Department of Electrical Engineering & Computer Science, University of Kansas, USA, Disponible en: <http://www.ittc.ku.edu/~jggs/courses/mwnets/lecture-manet-routing-print.pdf>, p. 89. (Lecture)
3. **Parissidis, Georgios; Karaliopoulos, Merkourios; Baumann, Rainer; Spyropoulos, Thrasylvoulos; Plattner, Bernhard**, (2009), "*Routing Metrics for Wireless Mesh Networks*", en *Guide to Wireless Mesh Networks*, Sudip Misra (Ed.), Print ISBN: 978-1-84800-908-0 Online ISBN: 978-1-84800-909-7, Springer London, DOI: 10.1007/978-1-84800-909-7_8, Disponible en: http://cgi.di.uoa.gr/~mkaralio/wp-content/uploads/papers/B1-Routing_metrics_for_Wireless_Mesh_Networks-Springer08.pdf, pp. 199-230. (Book Section)
4. **Batiste Troyano, Albert**, (2011), "*Protocolos de encaminamiento en redes inalámbricas mesh: un estudio teórico y experimental*" (en Español), Tesis de Maestría, Máster Oficial en Software Libre, Universitat Oberta de Catalunya, Disponible en: http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/8164/1/abatistet_TFM_0611.pdf, p. 136. (Thesis)
5. **Venkat Mohan, S.; Kasiviswanath, N.**, (2011) "*Routing Protocols for Wireless Mesh Networks*". *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 2. No. 8, Disponible en: <http://www.ijser.org/researchpaper%5CRouting-Protocols-for-Wireless-Mesh-Networks.pdf>, pp. 42-46. (Journal Article)
6. **Perkins, Charles E.; Bhagwat, Pravin**, (1994), "*Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers*", presentado al *ACM SIGCOMM '94 Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications*, Londres, Reino Unido, ISBN: 0-89791-682-4, pp. 234-244. (Conference Paper)
7. **Ching-Chuan, Chiang; Hsiao-Kuang, Wu; Liu, Winston; Gerla, Mario**, (1997), "*Routing in Clustered Multihop, Mobile Wireless Networks with Fading Channel*", presentado al *IEEE Singapore International Conference on Networks SICON'97*, Singapur, ISBN: 9789810231293, 9810231296, pp. 197-211. (Conference Paper)
8. **Baumann, Rainer; Heimlicher, Simon; Lenders, Vincent; May, Martin**, (2007), "*HEAT: Scalable Routing in Wireless Mesh Networks Using Temperature Fields*", presentado al *IEEE Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, Ad Hoc and Mesh Routing*, Helsinki, Finlandia, ISBN: 1-4244-0992-6, pp. 16-27. (Conference Paper)
9. **Waharte, Sonia; Boutaba, Raouf; Iraqi, Youssef; Ishibashi, Brent**, (2006) "*Routing protocols in wireless mesh networks: challenges and design considerations*". *Multimedia Tools and*

- Applications*, Vol. 9. No. 3, Disponible en: <http://www.yiraqi.net/test/Papers/Sonia06.pdf>, pp. 285-303. (Journal Article)
10. **Adjih, C.;Laouiti, A.;Minet, P.;Muhlethaler, P.;Qayyum, A., and Viennot, L.,** (2004) "*The Optimised Routing Protocol for Mobile Ad-hoc Networks: protocol specification*", No.5145, ISSN: 0249-6399, Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique, Francia, Disponible en: <http://hal.inria.fr/docs/00/47/17/12/PDF/5145.pdf>, p. 53. (Report)
 11. **Jacquet, P.;Muhlethaler, P.;Clausen, T.;Laouiti, A.;Qayyum, A., and Viennot, L.,** (2001), "*Optimized Link State Routing Protocol for Ad Hoc Networks*", presentado al *Multi Topic Conference, 2001. IEEE INMIC 2001. Technology for the 21st Century. Proceedings. IEEE International* Lahore, Pakistán, ISBN: 0-7803-7406-1, pp. 62-68. (Conference Paper)
 12. **Lee, Fenglien,** (2011), "*Routing in Mobile Ad Hoc Networks*", en *Mobile Ad-Hoc Networks: Protocol Design*, Prof. Xin Wang (Ed.), ISBN: 978-953-307-402-3, InTech, DOI: 10.5772/13155 Disponible en: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/12861.pdf>, pp. 299-322. (Book Section)
 13. **Grannes Graarud, Espen,** (2011), "*Implementing a Secure Ad Hoc Network*" (en Inglés), Tesis de Maestría, Máster en Ciencias en Tecnologías de las Comunicaciones, Norwegian University of Science and Technology, Disponible en: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:611526/FULLTEXT01.pdf>, p. 125. (Thesis)
 14. **Thakare, P.P.; Joshi, M. A.; Raut, A.D.,** (2012) "*A Review on Routing Protocols of Wireless Ad-Hoc Network Technology*". *International Journal of Networking*, Vol. 2. No. 1, Disponible en: http://www.bioinfopublication.org/files/articles/2_1_4_IJN.pdf, pp. 35-39. (Journal Article)
 15. **Park, V.; Corson, S.,** (2001), "*Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA) Version 1 Functional Specification*", Disponible en: <http://www.ietf.org/proceedings/53/I-D/draft-ietf-manet-tora-spec-04.txt>. (Internet Draft)
 16. **Draves, R.P.; Zill, B.D.; Padhye, J.D.,** "*System and method for link quality source routing*", Microsoft Corporation, US Patent Classification: 370/351, 370/469, No. US7376122 B2, 20 de mayo de 2008, Disponible en: <http://www.google.de/patents/US7376122>. (Patent)
 17. **Sarao, Pushpender; Garg, Sohan; Singh, YashPal,** (2013) "*A Comparative Study of Routing Protocols in Wireless Mesh Networks*". *International Journal in Multidisciplinary and Academic Research (SSIJMAR)*, Vol. 2. No. 5, Disponible en: <http://ssijmar.in/vol2no5/vol2no5.1.pdf>, pp. 1-11. (Journal Article)
 18. **Vijayakumar, K.P.; Ganeshkumar, P.; Anandaraj, M.,** (2012) "*Review on Routing Algorithms in Wireless Mesh Networks*". *International Journal of Computer Science and Telecommunications*, Vol. 3. No. 5, Disponible en: http://www.ijcst.org/Volume3/Issue5/p15_3_5.pdf, pp. 87-92. (Journal Article)
 19. **Dhenakaran, S.S.; A., Parvathavarthini,** (2013) "*An Overview of Routing Protocols in Mobile Ad-Hoc Network*". *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, Vol. 3. No. 2, Disponible en: http://www.ijarcsse.com/docs/papers/Volume_3/2_February2013/V3I2-0201.pdf, pp. 251-259. (Journal Article)

20. **Abolhasan, Mehran; Wysocki, Tadeusz; Dutkiewicz, Eryk**, (2004) "A review of routing protocols for mobile ad hoc networks". Vol. No., Disponible en: http://www.cs.mun.ca/~yzchen/papers/papers/routing/manet_routing_review_abolhasan_2004.pdf, pp. 22. (Journal Article)
21. **Schaumann, Jan**, (2002), "Analysis of the Zone Routing Protocol", Disponible en: <https://www.netmeister.org/misc/zrp/zrp.pdf>, pp. 1-21. (Electronic Article)
22. **Ishfaq, Modassir**, (2014) "Comparative Analysis of Ad Hoc Routing Protocols in Wireless Mesh Network Environment". *World Applied Sciences Journal*, Vol. 29. No. 3, Disponible en: [http://www.idosi.org/wasj/wasj29\(3\)14/14.pdf](http://www.idosi.org/wasj/wasj29(3)14/14.pdf), pp. 408-414. (Journal Article)
23. **Johnson, David; Ntlatlapa, Ntsibane; Aichele, Corinna**, (2008), "A simple pragmatic approach to mesh routing using BATMAN", presentado al *2nd IFIP International Symposium on Wireless Communications and Information Technology in Developing Countries*, Pretoria, South Africa, ISBN: 978-84-612-5570-2, pp. 10. (Conference Paper)
24. **Nandini, B.; Pabboju, Suresh; Narasimha, G.**, (2014) "Routing protocols for Wireless Mesh Networks: A comparative study". *International Journal of Multidisciplinary and Current Research*, Vol. 2. No. April/March 2014, Disponible en: <http://ijmcr.com/wp-content/uploads/2014/04/Paper20304-306.pdf>, pp. 304-306. (Journal Article)
25. **Mani, Uma; Chandrasekaran, Ramasamy; Sarma Dhulipala, V.R.**, (2013) "Study and Analysis of Routing Protocols in Mobile Ad-Hoc Network". *Journal of Computer Science*, Vol. 9. No. 11, Disponible en: http://www.researchgate.net/profile/Vrsarma_Dhulipala2/publication/257202594_STUDY_AND_ANALYSIS_OF_ROUTING_PROTOCOLS_IN_MOBILE_AD-HOC_NETWORK/file/3deec528c8bc03ce26.pdf, pp. 1519-1525. (Journal Article)
26. "Olsrd, an ad hoc wireless mesh routing daemon", Disponible en: <http://www.olsr.org/?q=taxonomy/term/16>, Fecha de acceso:13 de mayo 2014. (Web Page)
27. "Running OLSR on Android Phones", Disponible en: http://www.olsr.org/?q=olsr_on_android, Fecha de acceso:14 de marzo 2014. (Web Page)
28. "ProjectSPAN/android-manet-manager", Disponible en: <https://github.com/ProjectSPAN/android-manet-manager>, Fecha de acceso:17 de julio 2014. (Web Page)
29. **Cetinkaya, Egemen K.; Sterbenz, James P. G.**, (2011), "Ad Hoc Routing in ns-3", Departamento de Ingeniería Eléctrica y Ciencias de la Computación, Information Technology & Telecommunications Research Center, University of Kansas, Disponible en: <http://www.ittc.ku.edu/~jpgs/courses/mwnets/lecture-lab-manet-ns3-display.pdf>, p. 21. (Lecture)
30. **Chissungu, Edmundo; Blake, Edwin; Le, Hanh**, (2011), "Performance Comparison of B.A.T.M.A.N.d and B.A.T.M.A.N-adv ", presentado al *Southern Africa Telecommunication Networks and Applications Conference SATNAC 2011*, Londres, Reino Unido, pp. 250. (Conference Paper)

31. "B.A.T.M.A.N. - Better Approach to Mobile Ad-Hoc Networking", Disponible en: <http://events.ccc.de/camp/2007/Fahrplan/events/2039.en.html>, Fecha de acceso:14 de mayo 2014. (Web Page)
32. **Murray, David; Dixon, Michael; Koziniec, Terry**, (2010), "An Experimental Comparison of Routing Protocols in Multi Hop Ad Hoc Networks", presentado al 2010 Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference, Nueva Zelanda, ISBN: 978-1-4244-8172-9, pp. 159-164. (Conference Paper)
33. **Kobo, Hlabishi Isaac**, (2012), "Situation-aware routing for wireless mesh networks with mobile nodes" (en Inglés), Tesis de Maestría, Master of Science in the Faculty of Science, University of the Western Cape, Disponible en: http://etd.uwc.ac.za/xmlui/bitstream/handle/123456789/2961/Kobo_MSC_2012.pdf?sequence=1, p. 91. (Thesis)
34. **Friginal, Jesús; De Andrés, David; Ruiz, Juan Carlos; Gil, Pedro**, (2011) "Towards benchmarking routing protocols in wireless mesh networks". *ELSEVIER Ad Hoc Networks*, Vol. 9. No. 8, Disponible en: http://homepages.laas.fr/jfrigina/Jesus%20Friginal_files/papers/journals/FINAL.pdf, pp. 1374-1388. (Journal Article)
35. **Singh Sandhu, Davinder; Sharma, Sukesha**, (2012) "Performance Evaluation of BATMAN, DSR, OLSR Routing Protocols - A Review ". *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 2. No. 1, Disponible en: http://www.ijetae.com/files/Volume2Issue1/IJETAE_0112_35.pdf, pp. 184-188. (Journal Article)
36. **Dasa, Sumedha**, "B.A.T.M.A.N. protocol for Ubuntu(Linux) Part-1", Disponible en: <http://rocknirmanablogspot.com/2013/07/batman-protocol-for-ubuntulinux-part-1.html>, Fecha de acceso:13 de mayo 2014. (Web Page)
37. **Sicard, Leo; Markovics, Matyas; Manthios, Giannakis**, (2010) "An Ad-hoc Network of Android Phones Using B.A.T.M.A.N.", IT University of Copenhagen, Disponible en: <https://blog.itu.dk/SPVC-E2010/files/2011/08/13adhocandroid.pdf>, p. 8. (Report)
38. **Bowitz, Anne Gabrielle**, (2011), "Simulation of a Secure Ad Hoc Network Routing Protocol" (en Inglés), Tesis de Maestría, Master of Science in Communication Technology, Norwegian University of Science and Technology, Disponible en: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:453358/FULLTEXT01.pdf>, p. 107. (Thesis)
39. "Ad Hoc On demand Distance Vector (AODV) Routing protocol implementation", Disponible en: <http://www.codeforge.com/article/223158>, Fecha de acceso:15 de mayo 2014. (Web Page)
40. "AODV routing protocol", Disponible en: <http://www.codeforge.com/article/225709>, Fecha de acceso:15 de mayo 2014. (Web Page)
41. "AODV-UU ", Disponible en: <http://freecode.com/projects/aodvruu>, Fecha de acceso:15 de mayo 2014. (Web Page)

42. "An implementation of the Dynamic Source Routing (DSR) protocol for Linux", Disponible en: <https://github.com/erimatnor/dsr-uu>, Fecha de acceso: 15 de mayo 2014. (Web Page)
43. **Dhiman, Natasha; Singh, Jagtar**, (2013) "Implementation of Zone Routing Protocol using NS2 Simulator". *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, Vol. 3. No. 10, Disponible en: http://www.ijarcsse.com/docs/papers/Volume_3/10_October2013/V3I9-0370.pdf, pp. 273-279. (Journal Article)
44. "ZRPd", Disponible en: <http://ostatic.com/zrpd>, Fecha de acceso: 15 de mayo 2014. (Web Page)