



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

**Análisis de protocolos de encaminamiento
para redes inalámbricas tipo
malla en modo infraestructura**

Idónea Comunicación de Resultados
para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS
EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN
presentada por

Carlos Ernesto Carrillo Arellano

Asesor:

Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos

Defendida públicamente en la UAM-Iztapalapa el 12 de septiembre de 2011 a las 12:00 hrs
frente al jurado integrado por:

Presidente : Dr. Raúl Teodoro Aquino Santos, Universidad de Colima, Facultad de Telemática
Secretario : Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos, UAM - Iztapalapa, Redes y Telecomunicaciones
Vocal : Dr. Enrique Rodríguez de la Colina, UAM - Iztapalapa, Redes y Telecomunicaciones

Resumen

Las redes inalámbricas en malla (*Wireless Mesh Networks* - WMN) son un nuevo paradigma de las redes de datos. Esta novedosa propuesta tecnológica puede ser adaptada a diversos escenarios de aplicación, tales como: redes comunitarias, extensión inalámbrica de redes cableadas, sistemas de automatización, sistemas de transporte inteligente, etc. Las redes inalámbricas en malla en modo infraestructura (*Infrastructure WMN* - iWMN) son actualmente, la variante más prometedora para extender la cobertura de las redes cableadas, y particularmente la de *Internet*. Éstas, ofrecen conectividad inalámbrica a usuarios móviles a través de una arquitectura de red con características muy atractivas, entre las que destacan su bajo costo, eficiencia, escalabilidad, confiabilidad y sobre todo, su facilidad para ser desplegadas.

Las iWMN están conformadas por dos elementos fundamentales: la troncal de la red y el conjunto de usuarios móviles. La troncal de la red ó *backbone*, está integrado por nodos inalámbricos estáticos capaces de encaminar datos de manera cooperativa (*multihop network*), permitiendo así el establecimiento de rutas de comunicación entre usuarios móviles o bien entre estos usuarios y otras arquitecturas de red. Es debido a esta característica que cada uno de los nodos que conforman el *backbone* hereda las funciones y responsabilidades propias de un dispositivo de encaminamiento. Por esta razón, es necesario utilizar protocolos de encaminamiento que, además de lograr el establecimiento de rutas de comunicación, sean capaces de maximizar el desempeño de la red, minimizar los problemas inherentes a la misma, así como atender los requerimientos de las aplicaciones que residirán en ella. A pesar de las notorias diferencias entre redes *ad hoc* e iWMN, los protocolos de encaminamiento diseñados específicamente para las primeras han sido considerados como una plataforma viable para atender el problema de encaminamiento en estas últimas. Sin embargo, existen dudas justificadas sobre la eficiencia inducida por estos esquemas de encaminamiento en esta novedosa arquitectura de red, llegándose a afirmar que el desempeño inducido podría no ser óptimo.

Este trabajo de investigación busca contribuir a los esfuerzos de evaluación de desempeño de los protocolos de encaminamiento diseñados para redes *ad hoc* en iWMN. A través de la evaluación de desempeño de los esquemas de encaminamiento Ad hoc On Demand Distance Vector (AODV) y Destination Sequenced Distance Vector (DSDV) en iWMN, buscamos evidencia que permita identificar los pros y contras de esta adopción. Las propiedades principales para la elección de estos esquemas de encaminamiento son: su funcionalidad distribuida, su

exitosa aceptación en redes *ad hoc* y su representatividad de los esquemas de encaminamiento reactivo y proactivo.

Uno de los aportes más sobresalientes de ésta investigación consiste en el diseño e implementación de mejoras que permiten adaptar el comportamiento distribuido de cada protocolo de encaminamiento en una arquitectura de red jerárquica como lo es la de iWMN. A través de simulaciones computacionales, un escenario de simulación representativo y un conjunto significativo de parámetros de evaluación; se muestra la eficiencia inducida por cada esquema de encaminamiento en esta novedosa arquitectura de red. La interpretación y análisis de los resultados obtenidos en este trabajo, nos permite identificar características óptimas para el diseño de futuros protocolos de encaminamiento idóneos para iWMN. Los resultados finales de este trabajo indican que cada esquema de encaminamiento proporciona un mejor desempeño bajo condiciones particulares en la red. El protocolo de encaminamiento AODV ha inducido un mejor desempeño de la red cuando ésta presenta un nivel de carga bajo-medio; su comportamiento reactivo se ha adaptado eficazmente a los cambios constantes en la topología de la red y ha mejorado la distribución del tráfico dentro del *backbone* de la red. Por su parte DSDV ha optimizado la carga de señalización y sus mecanismos de encaminamiento se muestran más eficientes para ser ejecutados dentro del *backbone* de la red.

Contenido

Lista de Figuras	v
1. Introducción	1
1.1. Objetivos del proyecto	2
1.2. Metodología de la investigación	3
1.3. Contribución de la investigación	4
1.4. Organización de la Idónea Comunicación de Resultados	4
2. Redes inalámbricas	5
2.1. Introducción	5
2.2. Redes inalámbricas <i>ad hoc</i>	5
2.3. Redes inalámbricas en modo infraestructura	6
2.4. Redes inalámbricas híbridas	7
3. Redes inalámbricas en malla (WMN)	9
3.1. Introducción	9
3.2. Redes inalámbricas en malla (<i>Wireless Mesh Networks - WMN</i>)	9
3.3. Clasificación de WMN	10
3.3.1. Redes inalámbricas de clientes en malla	10
3.3.2. Redes inalámbricas en malla en modo infraestructura	11
3.3.3. Redes inalámbricas en malla híbridas	13
4. Encaminamiento en redes inalámbricas	15
4.1. Introducción	15
4.2. Protocolos de encaminamiento	15
4.2.1. Descripción	15
4.2.2. Algoritmo Vector-Distancia	16
4.2.3. Algoritmo de estado del enlace	17
4.3. Encaminamiento en redes <i>ad hoc</i>	19
4.3.1. Propiedades ideales del encaminamiento en redes <i>ad hoc</i>	19
4.4. Clasificación de los protocolos de encaminamiento	20
4.4.1. Clasificación basada en la estrategia de encaminamiento	20
4.5. Encaminamiento en iWMN	22

4.5.1.	Dificultades que presentan las iWMN	23
4.5.2.	Ventajas que presentan las iWMN	23
4.5.3.	Propiedades ideales de un protocolo para iWMN	24
4.5.4.	Principales diferencias entre redes <i>ad hoc</i> e iWMN	25
5.	Estado del arte	27
6.	Escenario de evaluación	31
6.1.	Introducción	31
6.2.	Simulador de eventos discretos <i>ns2</i>	31
6.3.	Escenario de simulación	32
6.4.	Tráfico y conectividad en la red	33
6.5.	Modelo de movilidad ' <i>Random Waypoint</i> '	34
6.6.	Modelo de propagación	35
6.7.	Medidas de desempeño	35
7.	Evaluación del protocolo AODV	37
7.1.	Protocolo Ad hoc On Demand Distance Vector	37
7.1.1.	Procedimiento de descubrimiento de ruta	38
7.1.2.	Mecanismo de mantenimiento de ruta	40
7.2.	Propuesta de mejora al protocolo de encaminamiento AODV	40
7.3.	Resultados de la simulación	42
7.3.1.	' <i>Throughput</i> ' y tasa de entrega promedio	42
7.3.2.	Retardo promedio y carga de señalización del protocolo	43
7.3.3.	Distribución del retardo	43
7.3.4.	Latencia de descubrimiento de trayectoria	45
7.3.5.	Distribución del tráfico y de las pérdidas en la malla	45
8.	Evaluación del protocolo DSDV	47
8.1.	Introducción	47
8.2.	Procedimiento de descubrimiento de ruta	48
8.3.	Propuesta de mejora al protocolo de encaminamiento DSDV	52
8.4.	Resultados de la simulación	53
8.4.1.	' <i>Throughput</i> ' y tasa de entrega promedio	53
8.4.2.	Retardo promedio y carga de señalización del protocolo	54
8.4.3.	Distribución del retardo	55
8.4.4.	Señalización del protocolo	56
8.4.5.	Distribución del tráfico y de las pérdidas en la malla	56
9.	Conclusiones y perspectivas para trabajo futuro	59
	Referencias	63

Lista de Figuras

2.1. Red inalámbrica ‘ <i>ad hoc</i> ’	6
2.2. Red inalámbrica en modo infraestructura.	7
2.3. Red inalámbrica híbrida.	7
3.1. Red inalámbrica de clientes en malla.	10
3.2. Red inalámbrica en malla en modo infraestructura.	12
3.3. Red inalámbrica en malla híbrida.	13
4.1. Identificadores para el algoritmo ‘Bellman-Ford’.	17
4.2. Tabla de encaminamiento del nodo A tras utilizar el algoritmo <i>Dijkstra</i>	18
6.1. Proceso de simulación con <i>ns2</i>	32
6.2. Escenario de simulación.	33
6.3. Modelo de tráfico ON/OFF	34
7.1. Mecanismo de inundado de la red (RREQ).	39
7.2. Mecanismo de respuesta de ruta (RREP).	39
7.3. Comunicaciones inválidas para la construcción de rutas en iWMN.	40
7.4. ‘ <i>Throughput</i> ’ y tasa de entrega promedio inducidos por AODV.	42
7.5. Retardo y carga de señalización promedio inducidos por AODV.	43
7.6. Histogramas del retardo promedio de extremo a extremo.	44
7.7. AODV Latencia promedio.	45
7.8. AODV Distribución del tráfico dentro del <i>backbone</i> de la red.	46
7.9. AODV Distribución de las pérdidas dentro del <i>backbone</i> de la red.	46
8.1. Señalización del protocolo DSDV.	49
8.2. Envío de un paquete de señalización DSDV del nodo Y al nodo X.	49
8.3. Estado de las tablas de encaminamiento durante el proceso de actualización.	50
8.4. Estado de las tablas de encaminamiento durante la integración de un nuevo nodo.	51
8.5. Estado de las tablas de encaminamiento durante la pérdida de un nodo.	51
8.6. ‘ <i>Throughput</i> ’ y tasa de entrega promedio inducidos por DSDV.	53
8.7. Retardo y carga de señalización promedio para DSDV.	54
8.8. Histogramas del retardo promedio de extremo a extremo.	55

8.9. Paquetes de datos enviados y recibidos por mensaje de señalización.	57
8.10. DSDV Distribución del tráfico dentro del <i>backbone</i> de la red.	57
8.11. DSDV Distribución de las pérdidas dentro del <i>backbone</i> de la red.	58

Capítulo 1

Introducción

El conocimiento ha sido el cimiento más importante sobre el cual se han erigido las sociedades modernas, y la información ha sido el pilar fundamental para la construcción y difusión del mismo. Sin embargo, actualmente la información se ha convertido en una necesidad imperante para diversos sectores de nuestra sociedad. Esta demanda ya no sólo es exclusiva del ámbito científico y tecnológico, sino que ha llegado a ser parte importante para el entretenimiento, las relaciones humanas y diversos escenarios cotidianos. Esta amplia gama de escenarios de aplicación de la información, ha generado una demanda importante de las sociedades modernas: *el acceso a la información*. De manera paralela, la adopción de diversas tecnologías inalámbricas móviles (PDAs, computadoras móviles, *PC tablets*, teléfonos celulares, etc.) como elementos de nuestra vida cotidiana, ha transformado los esquemas de acceso a la información y ha difundido masivamente el uso de las redes inalámbricas para compartir información entre estos dispositivos o bien para acceder a la base de información y conocimiento más importante de la actualidad: *Internet*. La conjunción de estos factores ha dado origen a la demanda de *conectividad total*, entendida ésta como la posibilidad de acceder a la información a cualquier hora y en cualquier lugar. Ahora bien, las soluciones de conectividad inalámbrica actuales, si bien exitosas, aún se ven limitadas para atender la demanda de conectividad total ya sea por factores económicos, de infraestructura, de planeación, entre otros.

Las redes inalámbricas en malla (*Wireless Mesh Networks - WMN*) son una nueva propuesta tecnológica que puede ser adaptada a diversos escenarios de aplicación, tales como: la extensión inalámbrica de redes cableadas, implementación de redes comunitarias, sistemas de automatización, sistemas de transporte inteligente [1, 2, 3, 4], entre otros. Las redes inalámbricas en malla en modo infraestructura (*Infrastructure Wireless Mesh Networks - iWMN*) son la variante que ofrece una solución viable y prometedora para ampliar, de manera inalámbrica, la cobertura de las redes cableadas (e.g. Internet). A través de una arquitectura de red eficiente, económica, escalable, tolerante a fallas y fácil de desplegar; las iWMN ofrecen conectividad inalámbrica a usuarios móviles y colaboran en el establecimiento de trayectorias de comunicación. Es así como esta novedosa arquitectura de red puede atender de manera eficiente la demanda de conectividad total, y se vislumbra como una solución prometedora para diversos escenarios de aplicación.

Fundamentalmente, las iWMN están compuestas por dos entidades importantes: la troncal de la red (*backbone*), y el conjunto de usuarios (clientes). A través de nodos inalámbricos estáticos, el *backbone* ofrece conectividad inalámbrica a los usuarios móviles y permite interconectar a dichos usuarios con otras arquitecturas de red. Cada nodo que conforma el *backbone* de la red, está encargado de encaminar flujos de información de manera cooperativa (*multihop network*). Esta característica exige que cada uno de estos nodos ejecute las funciones propias de un dispositivo de encaminamiento, definidas como: *el descubrimiento de posibles rutas de comunicación, selección de la ruta óptima y el mantenimiento de ésta*.

Las iWMN están estrechamente relacionadas con las redes *ad hoc*. Ambas arquitecturas cuentan con similitudes (e.g. redes inalámbricas *multihop*, nodos móviles, redes auto-administradas) así como también diferencias importantes. Factores como: la naturaleza estática de los nodos que conforman el *backbone* de la red, la ausencia de limitantes energéticas y de procesamiento en éstos, la distribución sesgada del tráfico dentro del *backbone*, los requerimientos heterogéneos de calidad de servicio (QoS) por parte de las aplicaciones que utilizan la red y el alto grado de escalabilidad de ésta, son solo una muestra de las diferencias más importantes entre estas arquitecturas. Los protocolos de encaminamiento para redes *ad hoc* están diseñados principalmente para mantener la conectividad de extremo a extremo así como para lidiar con los efectos inducidos por la movilidad. A pesar de que estos esquemas de encaminamiento han sido considerados sistemáticamente como una plataforma viable para resolver el problema de encaminamiento en iWMN, las diferencias entre estas arquitecturas de red, y los objetivos perseguidos por los protocolos de encaminamiento diseñados para redes *ad hoc*, han originado cuestionamientos sobre el desempeño inducido por dichos protocolos en iWMN, y se ha llegado a afirmar que dicho desempeño podría no ser óptimo.

Hasta la fecha de nuestra investigación, no se contaba con una evaluación detallada sobre los efectos de esta adopción y en consecuencia no existen resultados que señalen las características que debiera poseer un protocolo de encaminamiento para maximizar el desempeño de las iWMN, así como para atender los problemas inherentes a esta arquitectura de red y cumplir con los requerimientos que demandan las aplicaciones que deben residir en ella.

1.1. Objetivos del proyecto

- En este trabajo de investigación se busca evidencia que respalde o refute la adopción de protocolos de encaminamiento diseñados específicamente para redes *ad hoc* en iWMN. El objetivo principal de este proyecto es evaluar los protocolos de encaminamiento más populares y representativos del encaminamiento reactivo y proactivo en redes *ad hoc*, AAd hoc On Demand Distance Vector (AODV) y Destination Sequenced Distance Vector (DSDV). Partiendo de esta evaluación, se enumeran las características, de cada esquema de encaminamiento, que pueden ser adaptadas para iWMN.
-

- Los protocolos de encaminamiento diseñados para redes *ad hoc* fueron diseñados para ser implementados y ejecutados de manera distribuida sobre una arquitectura de red “plana”, donde todos los nodos que conforman la red tienen el mismo conjunto de responsabilidades. Es así que la organización jerárquica que existe en las iWMN, demanda modificaciones significativas al funcionamiento de estos protocolos. Como parte de los objetivos de este proyecto, se realizan un conjunto de adecuaciones para cada esquema de encaminamiento que permita su ejecución distribuida en una arquitectura de red jerárquica tal y como la presente en iWMN.
- A través de simulaciones computacionales se evaluará un conjunto de medidas de desempeño (caudal de datos (*throughput*), retardo de extremo a extremo, tasa de entrega, señalización del protocolo, latencia de adquisición de ruta, la distribución del tráfico y las pérdidas dentro del *backbone* de la red) que permitirán evidenciar los efectos inducidos por estos esquemas de encaminamiento en iWMN.
- Los resultados obtenidos por este trabajo de investigación nos dan la pauta para enumerar las ventajas e inconvenientes que se presentan al utilizar estos esquemas de encaminamiento, y nos auxilian en la identificación de las direcciones a seguir para futuras propuestas de encaminamiento específicas para iWMN.

1.2. Metodología de la investigación

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se utilizó la siguiente metodología:

- Estudio sobre arquitecturas de red inalámbricas y particularmente iWMN.
 - Revisión de la literatura sobre protocolos de encaminamiento diseñados para redes inalámbricas.
 - Revisión del estado del arte sobre evaluación de protocolos de encaminamiento en diversas arquitecturas de red inalámbrica, particularmente en redes *ad hoc* e iWMN.
 - Diseño de las propuestas de modificación a los protocolos de encaminamiento seleccionados para este proyecto.
 - Determinación de los parámetros de desempeño así como del escenario de simulación.
 - Codificación del escenario de simulación propuesto e implementación de las modificaciones a los protocolos de encaminamiento seleccionados.
 - Evaluación de desempeño de los protocolos de encaminamiento a través del simulador de eventos discretos *ns2*.
 - Análisis e interpretación de resultados.
 - Redacción de la idónea comunicación de resultados.
-

1.3. Contribución de la investigación

Los esfuerzos para atender el problema del encaminamiento en iWMN, se han diversificado. La propuesta de nuevos protocolos de encaminamiento así como la adecuación e integración de propuestas de encaminamiento ya existentes, y diseñadas para otras arquitecturas de red, han sido las líneas de acción más desarrolladas en la literatura. Cualquiera de estas aproximaciones resulta ser una tarea compleja, pues ésta requiere de un conocimiento previo y detallado del comportamiento y desempeño de la red ante diversas propuestas de encaminamiento. Nuestro trabajo busca contribuir a los esfuerzos de evaluación de desempeño de protocolos de encaminamiento, diseñados para redes *ad hoc*, aplicados en iWMN. Una de las características que distinguen a nuestra propuesta, es la modificación del comportamiento de los protocolos de encaminamiento para ser ejecutados de manera distribuida en una arquitectura jerárquica, como la que se presenta en iWMN. Los resultados de este trabajo contribuyen como una base de conocimiento que nos permita entender los efectos que inducen estos esquemas de encaminamiento y nos auxilie como guía para las tareas de adecuación o diseño de futuros protocolos de encaminamiento específicos para iWMN.

1.4. Organización de la Idónea Comunicación de Resultados

Este trabajo de investigación se organiza de la siguiente forma: En el Capítulo 2 se describen brevemente las redes inalámbricas y su clasificación. Del mismo modo, en el Capítulo 3 se aborda la clasificación y características más importantes de las WMN. En el Capítulo 4 se detalla el problema del encaminamiento en redes inalámbricas y particularmente en iWMN. El Capítulo 5 muestra la síntesis del estado del arte. El Capítulo 6 detalla las características del escenario de simulación y de los parámetros de evaluación. En el Capítulo 7 se describe la modificación propuesta para protocolo de encaminamiento AODV y se muestran los resultados de simulación obtenidos, mientras que la descripción y evaluación para el protocolo DSDV se muestran en el Capítulo 8. Las conclusiones de este trabajo de investigación son finalmente presentadas en el Capítulo 9.

Capítulo 2

Redes inalámbricas

2.1. Introducción

Hoy en día, el desarrollo tecnológico ha impactado significativamente en nuestro estilo de vida. El acceso e intercambio de información se ha transformado en una necesidad imperante para un sinnúmero de aplicaciones de la cotidianidad. Aunado a esto, la utilización masiva de dispositivos móviles de comunicaciones, ha demandado arquitecturas de red que permitan compartir información entre estos dispositivos de manera económica, eficiente y confiable. Las *redes de datos* brindan los recursos necesarios para interconectar dispositivos de telecomunicaciones, facilitando así el intercambio de información entre éstos.

A lo largo de los últimos 40 años, las redes inalámbricas se han consolidado como una de las clasificaciones más importantes de las redes de datos. Las *redes inalámbricas* son la arquitectura de comunicaciones más aceptada y difundida por un incontable número de aplicaciones y escenarios en donde la movilidad es un factor importante [5]. Estas redes están conformadas por dispositivos que utilizan medios de transmisión no guiados para establecer un canal de comunicaciones. El objetivo central de estas redes, es el intercambio de información entre dispositivos móviles, o bien entre dispositivos móviles y otras arquitecturas de red. Las redes inalámbricas han sido clasificadas con base en sus objetivos y características particulares. En este capítulo mostramos brevemente la clasificación fundamental en la que se organizan las redes inalámbricas con respecto a la arquitectura de red ó topología, y resaltamos algunas de sus propiedades más importantes.

2.2. Redes inalámbricas *ad hoc*

La concepción de las *redes inalámbricas ad hoc* se basó en el deseo de intercambiar información entre usuarios móviles de manera espontánea, económica y eficiente. Esta arquitectura de red está compuesta por nodos móviles capaces de establecer comunicación entre ellos a través de enlaces inalámbricos, sin necesidad de contar con un sistema de control de comunicaciones centralizado o con una infraestructura especial [6, 7], tal y como se muestra en la Figura 2.1. Las redes inalámbricas *ad hoc* son sistemas autoadministrados, donde factores

como la configuración, reparación y organización de la red se realizan automáticamente por los nodos que la componen.

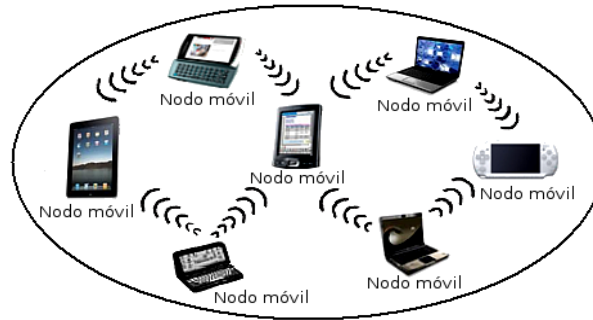


Figura 2.1: Red inalámbrica ‘*ad hoc*’.

Cada nodo inalámbrico de una red *ad hoc* cuenta con un rango de comunicaciones limitado, de tal forma que la comunicación entre nodos fuera de dicho rango requiere de la colaboración con otros nodos de la red para establecer una ruta de comunicaciones. Es así como cada nodo brinda sus recursos y contribuye de manera directa en el encaminamiento de información, actuando como *salto* intermedio en una ruta de comunicación (*red multihop*). Las redes *ad hoc* han sido utilizadas exitosamente en escenarios dinámicos, tales como redes tácticas, entornos comerciales, sistemas de localización, escenarios de salvamento y de emergencias así como en aplicaciones de entretenimiento. La ausencia de una infraestructura de comunicaciones convencional para su operación, le ha generado una demanda creciente dentro del terreno de las comunicaciones móviles.

2.3. Redes inalámbricas en modo infraestructura

Las redes inalámbricas en modo infraestructura son actualmente una de las arquitecturas de red más populares. Éstas ofrecen conectividad inalámbrica a usuarios móviles y permiten el intercambio de información entre usuarios, o bien entre usuarios móviles y otra arquitectura de red, por ejemplo Internet. A diferencia de la organización “plana” que existe en redes *ad hoc*, las redes inalámbricas en modo infraestructura cuentan con un dispositivo centralizado (*Punto de acceso - AP*) que actúa como interfaz de comunicaciones con la red cableada y coordina las comunicaciones entre dispositivos móviles [8], tal y como se muestra en la Figura 2.2. Esto aligera sustancialmente las funciones de los dispositivos móviles, pues concentra la organización y administración de la red en el AP. Esta arquitectura de red se ha utilizado eficazmente para ampliar inalámbricamente la cobertura de las redes cableadas. Sin embargo, extender la cobertura de las redes cableadas por medio de APs, es limitado debido al rango de alcance de éstos, así como por la infraestructura necesaria para crear células de cobertura distantes a la red cableada, lo que impacta de manera directa en la planeación, los recursos y el tiempo necesarios para ampliar la cobertura de la red.

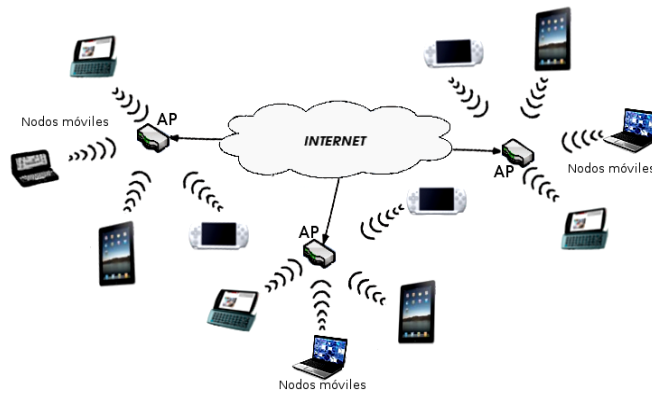


Figura 2.2: Red inalámbrica en modo infraestructura.

2.4. Redes inalámbricas híbridas

Las redes inalámbricas híbridas combinan el funcionamiento tanto de las redes *ad hoc* como el de las redes en modo infraestructura. De este modo, la conectividad entre los dispositivos que conforman la red es más flexible y ofrecen un amplio conjunto de propiedades que pueden ser adaptadas a diversas aplicaciones. La Figura 2.3 muestra un ejemplo de la conectividad existente en esta arquitectura de red. Bajo este esquema, los APs actúan como interfaces entre los dispositivos móviles y la red cableada, mientras que los dispositivos móviles son capaces de encaminar información entre ellos y, al mismo tiempo, pueden acceder directa o indirectamente a la red cableada. Estas características incrementan sustancialmente el desempeño de la red, pues se genera un sistema interconectado, dinámico y tolerante a fallas. Bajo esta arquitectura de red, la cobertura de la red cableada se ve sustancialmente incrementada, sin embargo, dada la libertad de movimiento de los nodos móviles dicha cobertura es altamente variable y poco estable.

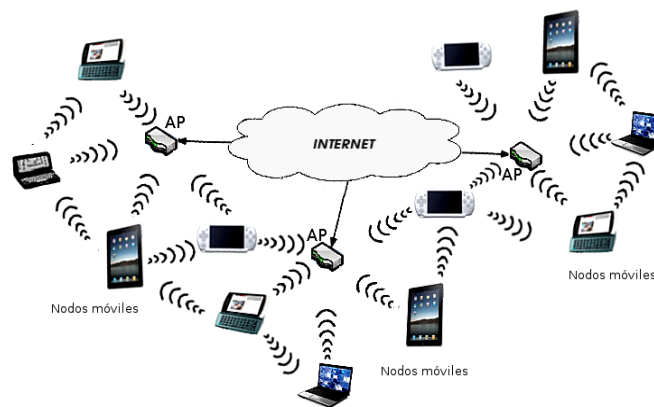


Figura 2.3: Red inalámbrica híbrida.

Capítulo 3

Redes inalámbricas en malla (WMN)

3.1. Introducción

A pesar de las grandes ventajas ofrecidas por las redes inalámbricas *ad hoc* (e.g. ausencia de infraestructura, un despliegue sencillo de la red y movilidad), el éxito de éstas se ha dado en sectores y aplicaciones muy particulares. Las aplicaciones de los sectores militares, de emergencias y de seguridad se adaptaron rápida y eficientemente en redes *ad hoc* y, por ende, dominaron las líneas de investigación para esta arquitectura de red. No obstante el número creciente de usuarios de dispositivos inalámbricos, las redes *ad hoc* no han mostrado una aceptación generalizada por parte de los usuarios de tecnologías inalámbricas, y esto es debido principalmente al deseo generalizado de acceso a la información que reside en Internet [9]. Por otro lado, las redes inalámbricas en modo infraestructura han mostrado una clara aceptación por parte de los usuarios de dispositivos móviles. Esto se debe a que ofrecen acceso inalámbrico y conectividad hacia redes cableadas y particularmente hacia Internet. Sin embargo, tratar de extender la cobertura de esta arquitectura de red para ofrecer acceso, desde cualquier punto, hacia Internet, se ve limitado por los requerimientos de infraestructura, planificación y tiempo de implementación. Las redes inalámbricas en malla han surgido como una alternativa original y novedosa para resolver las limitaciones de las arquitecturas de red mencionadas anteriormente. Combinando algunas propiedades de las redes *ad hoc* y de las redes en modo infraestructura, las redes inalámbricas en malla ofrecen un conjunto de propiedades atractivas para diversos escenarios de aplicación, entre los que destaca la ampliación inalámbrica de la cobertura de redes cableadas. En este capítulo se describe la clasificación de las redes inalámbricas en malla y se detallan sus características principales.

3.2. Redes inalámbricas en malla (*Wireless Mesh Networks - WMN*)

Las redes inalámbricas en malla (WMN estándar IEEE 802.11s) pueden ser conceptualizadas como un nuevo paradigma de la tecnología inalámbrica [10]. Esta propuesta tecnológica

es adaptable a numerosas aplicaciones y escenarios, entre los que destacan: la extensión de cobertura de redes cableadas, redes comunitarias, redes empresariales, sistemas de automatización, sistemas de transporte inteligente, sistemas de seguridad pública, etcétera [11]. Basadas en una arquitectura de red de bajo costo, auto administrada y confiable, las WMN han cobrado el interés tanto de firmas comerciales como de la comunidad científica, y esto se debe a la versatilidad que ofrecen para atender eficientemente distintas necesidades.

3.3. Clasificación de WMN

Las redes inalámbricas en malla son sistemas auto-organizados y auto-configurables, cuyos nodos establecen y mantienen conectividad entre ellos. Basándose en las funcionalidades y características de los nodos que componen la red, las WMN se han clasificado en tres categorías principales: redes inalámbricas de clientes en malla, redes inalámbricas en malla en modo infraestructura y redes inalámbricas en malla híbrida [12].

3.3.1. Redes inalámbricas de clientes en malla

Las redes inalámbricas de clientes en malla (*Client Wireless Mesh Networks - cWMN*) son redes *peer-to-peer* entre dispositivos inalámbricos móviles. En esta arquitectura de red los dispositivos móviles son capaces de encaminar flujos de información sin necesidad de utilizar dispositivos de encaminamiento dedicados, de manera similar al comportamiento que existe en las redes *ad hoc*. Bajo este esquema, las funciones de configuración y de encaminamiento recaen en los dispositivos móviles que conforman la red, incrementando sustancialmente la complejidad de éstos. La organización básica de estas redes se muestra en la Figura 3.1. En las cWMN, un paquete de datos puede pasar por varios nodos de la red para llegar a un nodo destino (red *multihop*), de tal foma que la cooperación, entre los nodos de la red, es necesaria para intercambiar información entre un nodo fuente y un nodo destino lo suficientemente alejados como para comunicarse directamente entre ellos.

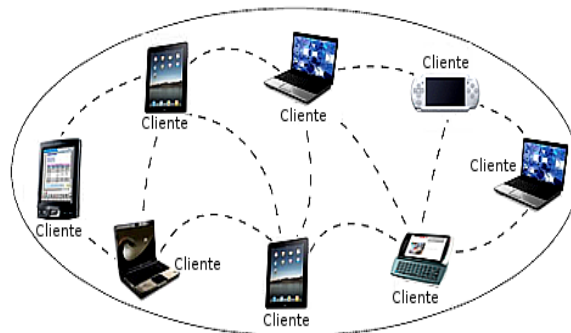


Figura 3.1: Red inalámbrica de clientes en malla.

3.3.2. Redes inalámbricas en malla en modo infraestructura

Una de las subclases más importantes de las WMN son las redes inalámbricas en malla en modo infraestructura (*Infrastructure Wireless Mesh Networks - iWMN*). Esta novedosa propuesta tecnológica, ha surgido como una de las alternativas más viables para extender la cobertura de las redes cableadas [13]. A través de una arquitectura de red, que resultará ser eficiente, escalable, económica y fácil de implementar, las iWMN brindan acceso inalámbrico a usuarios móviles, así como a redes heterogéneas, y permite establecer conectividad entre estos elementos. El potencial de esta novedosa arquitectura le permite ser adaptada a diversos escenarios de aplicación, sin embargo, atender la creciente demanda de *conectividad total* es uno de los objetivos principales de esta tecnología.

A diferencia de la arquitectura de red “plana” que existe en cWMN, las iWMN presentan una organización jerárquica de la red, al utilizar un conjunto de nodos dedicados a los que se les ha asignado un conjunto de funciones específicas [14]. Las iWMN se componen por dos elementos fundamentales: la troncal o *backbone* de la malla, y el conjunto de usuarios móviles. El *backbone* de una iWMN se compone por nodos inalámbricos estáticos y, por ende, se asume que éstos no tienen restricciones de energía, de procesamiento o de almacenamiento. Cada nodo que compone al *backbone* de la red, posee un rango de comunicaciones limitado, de tal forma que la cooperación entre estos nodos es la que permite establecer trayectorias de comunicación para nodos lo suficientemente distantes como para establecer comunicación directa entre ellos. De esta forma, cada nodo del *backbone* brinda sus recursos para encaminar información a través de la red y colabora en el establecimiento de rutas de comunicación (*red multihop*). Es así como el *backbone* de la red ofrece un servicio de interconexión de bajo costo, confiable y eficiente, que permite el establecimiento de comunicaciones entre usuarios móviles o bien entre usuarios móviles y otras arquitecturas de red, siendo el mejor ejemplo Internet.

Composición de las iWMN

La organización jerárquica de una iWMN se ilustra en la Figura 3.2. Los nodos que componen esta arquitectura de red, así como sus funciones asociadas, se organizan de la siguiente manera [15]:

- **MPP** - Portal de la malla (*Mesh Portal Point*)
Los MPPs actúan como interfaces de enlace entre la iWMN y la red cableada. Estos dispositivos son los responsables del intercambio de paquetes entre ambas arquitecturas de red.
 - **MAP** - Punto de acceso a la malla (*Mesh Access Point*)
Los MAPs ofrecen conectividad inalámbrica a los usuarios de la red. Estos dispositivos reciben paquetes de datos provenientes de los usuarios móviles y son responsables de enviarlos a través del *backbone* para hacerlos llegar hasta su destino.
 - **MP** - Punto de la malla (*Mesh Point*)
-

Los MPs solo realizan funciones de encaminamiento de información dentro del *backbone* de la red.

- **STA** - Estación móvil (*Mobile Station*)

Las STAs (usuarios) utilizan el *backbone* de la red para establecer comunicaciones. Es decir, el intercambio paquetes de datos entre STAs, o bien entre STAs y otras arquitecturas de red, ej. Internet.

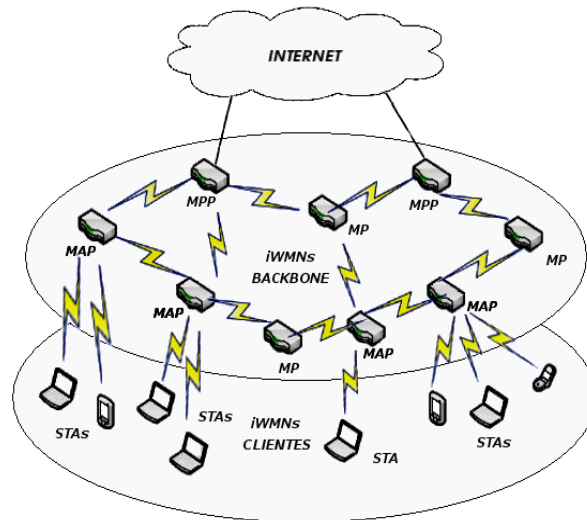


Figura 3.2: Red inalámbrica en malla en modo infraestructura.

Características de las iWMN

La arquitectura de red de las iWMN puede ser considerada como una arquitectura híbrida, ésta combina las características y propiedades de otras arquitecturas de red, tales como *redes ad hoc* y *redes en modo infraestructura*. Consecuentemente, las iWMN poseen un conjunto de características comunes a estas arquitecturas de red [16]. A continuación se resumen las particularidades de esta arquitectura de red:

1. Cada uno de los nodos inalámbricos que conforman al *backbone* de la red posee un rango limitado de comunicaciones; por esta razón la cooperación de los diversos nodos de la red es necesaria para el establecimiento de caminos de comunicación. Esto induce un comportamiento multi-salto en el *backbone* de la red y asigna, a cada nodo que lo compone, las responsabilidades y funcionalidades de un dispositivo de encaminamiento.
2. El grado de movilidad de los nodos que conforman el *backbone* de la red se puede considerar nulo, mientras que para los clientes de la red se considera aleatorio e ilimitado. Esto impacta de manera directa en la topología de la red, induciendo cambios dinámicos en la misma.

- Factores tales como la energía, el procesamiento y el almacenamiento, son comúnmente limitados para los clientes de la red; mientras que los nodos que conforman el *backbone* no tiene restricción alguna sobre estos parámetros.
- La compatibilidad y operatividad con otras arquitecturas de red, es una característica requerida para las iWMN. Dado que deben soportar flujos de tráfico hacia y desde otras arquitecturas de red, así como flujos de información P2P entre los usuarios de la red.
- Dado que una de las principales aplicaciones de las iWMN es interconectar diferentes arquitecturas de red, la mayor parte del tráfico en la red pasará a través de los MPP. Es así que el tráfico tendrá una distribución sesgada en la red. Pues a medida que la distancia entre un nodo del *backbone* y el MPP disminuye, la cantidad de tráfico en este primer nodo aumentará, generando constantemente cuellos de botella en las cercanías de los MPP.

3.3.3. Redes inalámbricas en malla híbridas

Las redes inalámbricas en malla híbridas (*Hybrid Wireless Mesh Network - hWMN*) combinan las propiedades tanto de las cWMN como de las iWMN; así los clientes pueden enviar paquetes de información a través del *backbone* o bien encaminar información entre ellos [17]. La capacidad de encaminamiento de los clientes de la malla ofrece una conectividad mejorada así como una cobertura dinámica de la red. La Figura 3.3 ilustra esta arquitectura de red. Si bien es una arquitectura de red mejorada, su implementación exige dispositivos móviles tecnológicamente más sofisticados y eficientes.

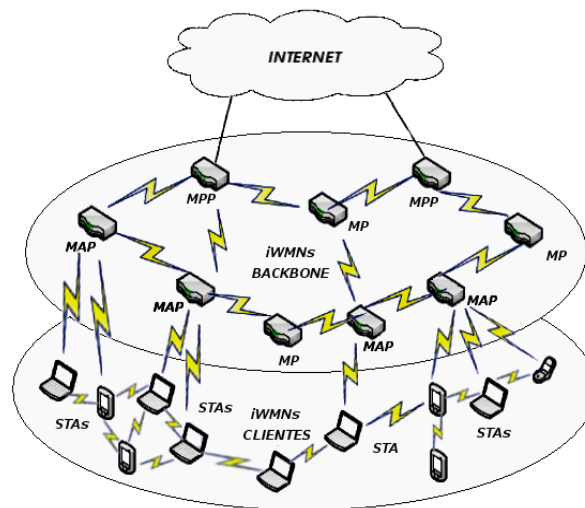


Figura 3.3: Red inalámbrica en malla híbrida.

Capítulo 4

Encaminamiento en redes inalámbricas

4.1. Introducción

El encaminamiento se define como el conjunto de funciones necesarias para determinar los nodos intermedios por donde debe viajar un paquete de datos para transitar desde un nodo fuente hasta un nodo destino en una red *multihop*. En esencia, el problema del encaminamiento puede entenderse como un problema de optimización, donde comúnmente se desea encontrar el camino más corto para comunicar un nodo fuente y un nodo destino [18]. Las redes inalámbricas tienen propiedades particulares y un comportamiento característico que se traduce en retos para el diseño de un protocolo de encaminamiento. A pesar del éxito y popularidad de los protocolos diseñados para redes cableadas, los efectos de la movilidad y la variabilidad de las propiedades de los enlaces inalámbricos limitan la utilización de estos protocolos en un ambiente inalámbrico. En este capítulo abordamos el problema del encaminamiento en redes inalámbricas y detallamos las ventajas y desventajas que ofrecen las iWMN para el diseño de éstos.

4.2. Protocolos de encaminamiento

4.2.1. Descripción

Una red *multihop* es un sistema de comunicaciones conformado por múltiples nodos capaces de encaminar información. En este tipo de redes, cada paquete puede ser encaminado por diversos nodos para transitar desde un nodo fuente hasta un nodo destino. Uno de los factores clave para el desempeño de una red *multihop*, es el protocolo de encaminamiento usado en ésta. El objetivo de un protocolo de encaminamiento es hallar una ruta óptima de comunicaciones para intercambiar información entre un nodo fuente y un nodo destino [19]. Los protocolos cuyo objetivo es encontrar la distancia más corta entre fuente y destino han sido ampliamente utilizados en redes multi-salto. Las funciones elementales que realiza un protocolo de encaminamiento consisten en: *el descubrimiento de rutas de encaminamiento, selección de la ruta óptima y el mantenimiento de ésta.*

Para *descubrir* el conjunto de posibles rutas de encaminamiento, el protocolo de encaminamiento utiliza mecanismos de recolección de información que le permiten determinar los puntos intermedios por donde podría viajar la información desde un nodo fuente hasta su destino. El proceso de *selección* de una ruta óptima puede ser visto como un problema de optimización, en el cual las *métricas* de encaminamiento son parámetros de desempeño que el protocolo de encaminamiento deberá optimizar a través de la selección de una ruta de comunicaciones. Éstas pueden ir desde la minimización del retardo y de las pérdidas, o bien la maximización del *caudal de datos* (*throughput*), entre otras. Finalmente, el proceso de *mantenimiento* de la ruta seleccionada, monitorea el estado de la trayectoria de comunicaciones y reacciona de manera oportuna ante una eventual dificultad en la misma. La forma en la que cada protocolo de encaminamiento resuelve el problema del encaminamiento difiere en virtud del algoritmo que cada protocolo ejecute, por ejemplo un protocolo de encaminamiento puede utilizar un mecanismo de recolección de información reactivo en conjunto con la métrica de minimización del retardo y un esquema proactivo de monitoreo de conectividad en los enlaces de la ruta seleccionada. Gran parte de los protocolos de encaminamiento han sido diseñados con base en dos clases importantes de algoritmos: *estado del enlace* y *vector-distancia* [20].

4.2.2. Algoritmo Vector-Distancia

El algoritmo vector-distancia ha sido utilizado con mucha frecuencia para diseñar protocolos de encaminamiento y es comúnmente conocido como el algoritmo de Bellman-Ford. A través de un procedimiento simple, este algoritmo es capaz de determinar rutas de encaminamiento de menor costo con respecto a una medida de desempeño específica, e.g. retardo, longitud, tasa de error, etc [18]. Con este algoritmo, cada nodo de la red estima el costo de la ruta para comunicarse con un nodo destino, basado en los costos proporcionados por sus nodos vecinos. Periódicamente, cada nodo intercambia con sus nodos vecinos su tabla de encaminamiento. De este modo, cada nodo es capaz de estimar qué nodo vecino es el mejor candidato para comunicarse con un nodo destino. En este algoritmo, cada nodo i administra una tabla de encaminamiento en la cual almacena el nodo inmediato que permite alcanzar al nodo destino j de manera óptima. El mecanismo que permite determinar el nodo inmediato para la ruta de comunicaciones es el siguiente: Sea $D_{i,j}$ el costo de la ruta óptima para comunicar al nodo i con el nodo j y sea k_m cada uno de los m nodos vecinos de i . Los costos de los enlaces entre los nodos i y k_m se define como d_{i,k_m} . Asumiendo que los costos de los enlaces son aditivos, la ruta con el menor costo para comunicar a los nodos i y j puede ser obtenida tras resolver las ecuaciones de Bellman [20], expresadas como:

$$D_{i,i} = 0, \forall i \quad (4.1)$$

$$D_{i,j} = \min (d_{i,k_m} + D_{k_m,j}) \text{ para } i \neq j \quad (4.2)$$

Con la condición inicial

$$D_{i,j} = \infty \text{ para } i \neq j \quad (4.3)$$

Para resolver la ecuación (4.2), cada nodo i de la red utiliza la información proveniente de sus m nodos vecinos, recolectando la distancia óptima $D_{k_m,j}$, veáse Figura 4.1. El nodo i añade el costo del enlace d_{i,k_m} a la distancia recolectada $D_{k_m,j}$, y estima un conjunto de m costos para comunicarse con el nodo j . El nodo vecino que proporcione el menor costo total para la trayectoria, será seleccionado como el salto inmediato para comunicarse con el nodo j . Este procedimiento es realizado periódicamente y de manera distribuida en la red; la sucesión de nodos elegidos de este modo selecciona la trayectoria que minimiza el costo de la ruta. La complejidad computacional de este algoritmo, para hallar las rutas de menor costo desde un nodo fuente hacia todos los posibles destinos de la red, es $O(N^3)$ donde N es el número de nodos que componen la red.

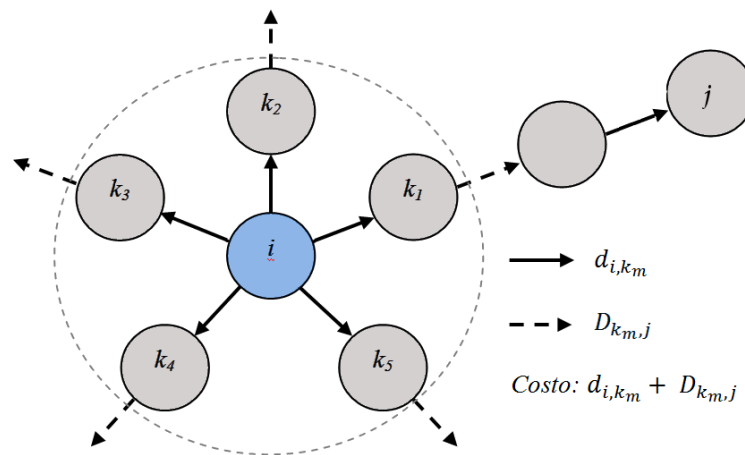


Figura 4.1: Identificadores para el algoritmo ‘Bellman-Ford’.

4.2.3. Algoritmo de estado del enlace

En el contexto del algoritmo de estado del enlace, la red se convierte en un grafo de nodos y enlaces interconectados. Cada nodo posee una visión local de la red, con base a las propiedades de los enlaces que lo conectan con sus nodos vecinos, de aquí el término de *estado del enlace*. Esta clase de algoritmo se ha vuelto muy popular actualmente, y es una alternativa que compite con otras aproximaciones tales como el algoritmo de encaminamiento vector-distancia [18]. Bajo el algoritmo de encaminamiento de estado del enlace, cada nodo distribuye el costo de los enlaces que lo conectan con sus nodos vecinos a todos los otros nodos de la red. Esta información que intercambian los nodos de la red, incluye la identidad del nodo que la origina, un listado de sus enlaces y el costo operacional de cada uno de ellos. Este mecanismo brinda a cada nodo, una visión global de la topología de red. El procedimiento más común para intercambiar la visión local de los enlaces de cada nodo es el *inundado*, donde cada nodo que recibe la información de algún otro nodo (*database link-state*), es responsable de reexpedir esta información hacia sus nodos vecinos; este procedimiento continua hasta que todos los nodos de la red han recibido dicha información. Una vez que un nodo

obtiene la información referente a la red, deberá calcular las trayectorias óptimas de comunicación utilizando algoritmos diseñados para este fin. El algoritmo de *Dijkstra* es el método más popular para calcular las trayectorias óptimas de comunicación en este escenario [20].

El algoritmo de *Dijkstra* opera de la siguiente forma:

- Define dos conjuntos de nodos: aquellos cuya distancia más corta ha sido encontrada y aquellos nodos a los que se le ha encontrado una trayectoria candidata a ser la óptima.
- Durante el proceso de inicialización, el costo de los enlaces hacia los nodos vecinos es almacenado como trayectoria candidata. En el ejemplo que se muestra en la Figura 4.2, podemos mostrar el desarrollo del algoritmo en el nodo *A*. En una primera etapa, *A* recibe la información proveniente de sus nodos vecinos (*E* y *B*) y los considera como candidatos para la trayectoria óptima. Es decir $A - E$ con costo 1 y de $A - B$ con costo 4.
- En un segundo paso, el nodo *A* recibe la información concerniente a los vecinos de *B* y determina la trayectoria $B - C$ como candidata óptima con un costo de 5.
- Tras recibir la información del vecino de *E*, el nodo *A* puede determinar que la trayectoria más corta para llegar a *C* es $E - C$, y ésta es ahora considerada como la ruta candidata, pues su costo (2) es menor al costo obtenido por la trayectoria $B - C$. Paralelamente, el nodo *A* almacena la trayectoria $E - D$ como una trayectoria candidata con un costo de 4.
- En caso de existir más nodos en la red, el procedimiento continua hasta alcanzar un estado estable, es decir, el momento en que ya no existan cambios en la tabla de encaminamiento.

La complejidad del algoritmo de *Dijkstra* es $O((n + l) \times \log(n))$, donde l es el número de enlaces de la red y n el número de nodos que la componen.

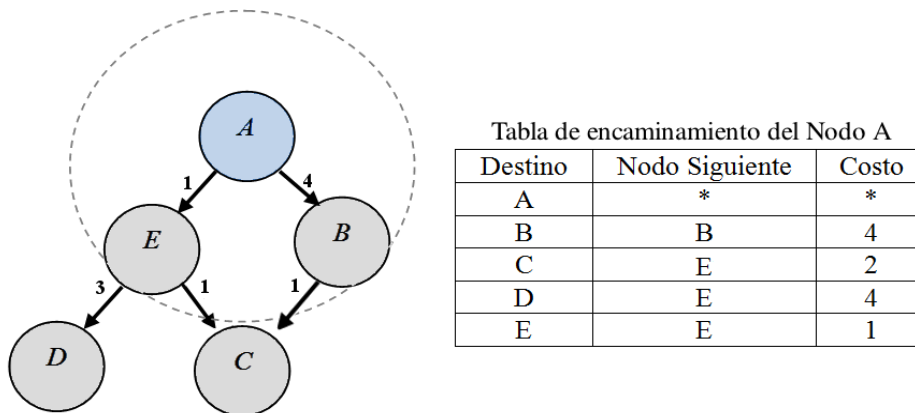


Figura 4.2: Tabla de encaminamiento del nodo A tras utilizar el algoritmo *Dijkstra*.

4.3. Encaminamiento en redes *ad hoc*

El encaminamiento en una red inalámbrica *ad hoc* tiene como objetivo principal el establecimiento de trayectorias de comunicación entre los dispositivos inalámbricos que conforman la red. Sin embargo, dadas las características de este tipo de redes, analizadas en la Sección 2.2, el encaminamiento enfrenta retos complejos entre los que se destacan:

- **Topología dinámica** - Este es uno de los aspectos más problemáticos para un protocolo de encaminamiento en redes *ad hoc*. El movimiento aleatorio de los nodos que componen la red origina cambios constantes en la topología de la red, demandando la existencia creciente de paquetes de señalización que permitan detectar y responder oportunamente a los cambios en la red.
- **Enlaces asimétricos** - A diferencia de los enlaces simétricos que comúnmente se encuentran en las redes cableadas, el medio inalámbrico de las redes *ad hoc* tiende a sufrir de un comportamiento asimétrico, y a presentar variabilidades de las propiedades de los enlaces. El comportamiento asimétrico de los enlaces inalámbricos, surge de las diferencias cualitativas del medio. Es decir, la calidad del enlace entre dos nodos, ej. A y B , en dirección $A \rightarrow B$ puede ser diferente a la calidad en la dirección contraria, $A \leftarrow B$.
- **Interferencia** - La interferencia entre las transmisiones de los nodos que componen la red es otra de las dificultades a las que se enfrenta un protocolo de encaminamiento para redes *ad hoc*. Dado que los enlaces inalámbricos son inestables y la topología de la red cambia constantemente, la interferencia entre transmisiones se vuelve común bajo estos efectos de la red.
- **Escalabilidad** - Las redes *ad hoc* pueden ser conformadas por una gran cantidad de nodos. Esta propiedad demanda que la convergencia de un protocolo de encaminamiento no sea significativamente afectada por el número de elementos en la red.

4.3.1. Propiedades ideales del encaminamiento en redes *ad hoc*

Un protocolo de encaminamiento, idealmente, debe de poseer un conjunto de propiedades que le permitan adecuarse eficientemente a las características de las redes inalámbricas *ad hoc* [21]. Destacan las siguientes:

- **Funcionamiento distribuido** - Debido a la ausencia de un dispositivo centralizado en esta arquitectura de red, el protocolo de encaminamiento debe de ser ejecutado de manera distribuida entre los elementos de la red.
 - **Libre de bucles** - Un protocolo de encaminamiento debe optimizar los recursos de la red, de tal forma que las rutas de comunicación deben de evitar la presencia de bucles que se traducen en un desperdicio de ancho de banda y de procesamiento.
-

- **Adaptabilidad al medio** - El medio inalámbrico induce efectos negativos en los enlaces inalámbricos (unidireccionalidad, asimetrías, pérdidas de conectividad, etc.), razón principal por la que un protocolo de encaminamiento debe ser capaz de utilizar inteligentemente estos efectos, o bien minimizar su efecto negativo sobre las comunicaciones.
- **Mínimo consumo energetico** - Una de las características de los nodos que componen una red *ad hoc* es la limitante energética. La movilidad de los nodos requiere que la energía individual de éstos dispositivos, provenga de contenedores de energía propios. Un protocolo de encaminamiento debe tomar en cuenta esta limitante y reducir al mínimo el consumo de energía.
- **Múltiples trayectorias** - Una característica de las redes inalámbricas *ad hoc* es la existencia de múltiples rutas para interconectar un nodo fuente y un nodo destino. Un protocolo de encaminamiento debe ser capaz de contemplar rutas alternativas que le permitan reaccionar de manera oportuna ante cualquier eventualidad en la red.
- **Sencillez** - El nivel de procesamiento de los dispositivos móviles que conforman la red es limitado, por ende, un protocolo de encaminamiento debe contar con una baja demanda de procesamiento, debe ser fácil de implementar y debe tener una baja latencia de ejecución.
- **Escalable** - Un aumento significativo del número de nodos que componen la red no debe afectar las prestaciones de la red. Un protocolo de encaminamiento debe de ser capaz de ser funcional aún bajo la tendencia creciente de la red.

4.4. Clasificación de los protocolos de encaminamiento

Las diversas formas en la que pueden ser ejecutadas las funciones de encaminamiento, las diversas métricas de encaminamiento, así como las necesidades de las aplicaciones y las condiciones de tráfico en la red, han generado un amplio catálogo de propuestas de encaminamiento para redes inalámbricas *ad hoc* [22]. La clasificación de estas propuestas de encaminamiento puede ser realizada basándose en diferentes criterios. Uno de los trabajos más pormenorizados sobre las diversas clasificaciones en las que se pueden catalogar los protocolos de encaminamiento ha sido presentado por Jiménez [23] en 2009. En seguida mostramos los detalles de la clasificación que toma como base la estrategia de encaminamiento.

4.4.1. Clasificación basada en la estrategia de encaminamiento

La clasificación basada en la estrategia de encaminamiento se fundamenta en la forma en que son ejecutadas las funciones de encaminamiento, es decir, el momento en que cada protocolo de encaminamiento calcula y selecciona la ruta de comunicaciones para un par de

nodos [24]. Esta clasificación es ampliamente citada en la literatura y subdivide a los protocolos de encaminamiento en tres clases fundamentales: *protocolos de encaminamiento proactivos, reactivos e híbridos*. La Tabla 4.1 resume y compara las singularidades más relevantes de estos esquemas de encaminamiento. A continuación detallamos estas características.

Encaminamiento proactivo

En esta clase de protocolos la recopilación de información de encaminamiento y el cálculo de la ruta óptima de comunicaciones se realizan periódicamente a través del intercambio de paquetes de señalización, pues comúnmente éstos proveen información acerca de la topología de la red. Cada nodo en la red mantiene conocimiento de las trayectorias hacia todos los destinos de la red en todo momento, aún sin tener la necesidad de transmitir información. Dado que la información de las rutas de encaminamiento es almacenada en tablas de ruteo, es común hacer referencia a estos protocolos como dirigidos por tabla (*table-driven*). Bajo este esquema de encaminamiento la latencia de transmisión es nula y las rutas calculadas se ajustan dinámicamente ante cualquier cambio de la topología de la red, sin embargo, la sobrecarga de señalización de encaminamiento, la escalabilidad de la red y el uso innecesario del ancho de banda son parte de los problemas que provoca el uso de este esquema de encaminamiento.

Encaminamiento reactivo

En contraste con los protocolos proactivos, en los protocolos reactivos la recopilación de información de encaminamiento y el cálculo de rutas se realiza a la demanda, es decir, solo en el momento en que un nodo requiere transmitir información y desconoce una ruta para comunicarse con el nodo destino. El esquema petición/respuesta es utilizado usualmente por estos protocolos. Cada vez que un nodo requiere transmitir información, éste inunda la red con mensajes de petición de ruta y espera que al llegar este paquete al nodo destino, éste envíe un paquete de respuesta, lo cual permitirá establecer una trayectoria de comunicaciones. Bajo este esquema de encaminamiento se evita la sobrecarga de señalización, se mejora la escalabilidad de la red y permite adaptar estos protocolos a entornos altamente dinámicos. La latencia de transmisión dependerá del tamaño de la red y una falla en una ruta de comunicaciones requerirá del redescubrimiento de una nueva trayectoria, lo cual representa demandas de tiempo, de cómputo y de recursos de la red.

Encaminamiento híbrido

Dado que los esquemas de encaminamiento proactivos y reactivos tienen propiedades que les permiten adecuarse de manera eficiente a diversos entornos, el encaminamiento híbrido combina ambos esquemas para hallar un balance entre las prestaciones que ofrece cada uno de éstos. Comúnmente un protocolo híbrido asigna el uso de protocolos de encaminamiento proactivos a zonas de baja movilidad, mientras que el esquema reactivo es mayormente utilizado en zonas de la red altamente dinámicas. Esto le permite al protocolo de encaminamiento, adecuarse de manera óptima a las diferentes características de la red.

Propiedad	Encaminamiento proactivo	Encaminamiento reactivo
Estructura de encaminamiento	Tanto plano como jerárquico	Mayormente plano
Descubrimiento de trayectorias	Procedimiento realizado de manera periódica. Se mantiene conocimiento de rutas hacia todos los destinos de la red en todo momento.	Procedimiento realizado a la demanda. Las rutas de encaminamiento se descubren solo cuando se requiere transmitir información
Señalización	Propagación constante de información sobre la topología de la red aún cuando ésta no cambie.	No hay actualizaciones constantes, la señalización de encaminamiento solo es propagada cuando existe un cambio en la topología de la red
Manejo de la energía	Debido al envío periódico de información de encaminamiento, el consumo de energía es considerable.	Menor consumo energético, inducido por una menor carga de señalización del protocolo
Latencia de transmisión	Mínima, pues la transmisión de paquetes de datos inicia inmediatamente.	Depende del tamaño de la red y de la eficiencia del protocolo para hallar una ruta de comunicaciones.
Requerimientos de almacenamiento	Alto	Dependerá del número de rutas requeridas y almacenadas. Usualmente menor al del esquema proactivo.

Tabla 4.1: Diferencias fundamentales entre esquemas de encaminamiento proactivo y reactivo.

4.5. Encaminamiento en iWMN

El encaminamiento en iWMN es una operación compleja, que debe contemplar las características de la red para cumplir con los requerimientos de desempeño de las aplicaciones que residirán en ella. Tanto las métricas de encaminamiento así como la estrategia de encaminamiento, tienen una enorme influencia en el desempeño de los protocolos y de la red misma.

La principal aplicación de las iWMN es ofrecer acceso inalámbrico a usuarios móviles y colaborar en el establecimiento de trayectorias de comunicación con otras arquitecturas de red, y en este proceso los parámetros de optimización que un protocolo de encaminamiento debe atender son: mantener la conectividad de extremo a extremo, minimizar el retardo, optimizar el balance de la carga en la red, aumentar la confiabilidad y escalabilidad de la red, manejar eficazmente el ancho de banda y maximizar el caudal de datos (*throughput*) [16]. Para que un protocolo de encaminamiento cumpla con los requisitos planteados, deberá ser

capaz de enfrentar un conjunto de dificultades inherentes a la red y aprovechar al máximo las ventajas que ofrece la misma.

Las iWMN heredan funcionalidades y comportamientos propios de las redes cableadas así como de las redes inalámbricas *ad hoc*. Esta naturaleza híbrida hace que las dificultades que enfrenta un protocolo de encaminamiento se compongan de una mezcla de problemas heredados de ambas arquitecturas. A continuación se enumeran brevemente las dificultades y ventajas que un protocolo de encaminamiento para iWMN debe afrontar y explotar respectivamente.

4.5.1. Dificultades que presentan las iWMN

Las dificultades a las que debe enfrentarse un protocolo de encaminamiento para iWMN son variadas, a continuación enumeramos las más importantes:

1. El tráfico en la red es heterogéneo y está compuesto por flujos con diversos requerimientos de calidad de servicio (QoS), tal y como sucede en Internet. Esto demanda que el protocolo de encaminamiento sea capaz de atender estas necesidades tras optimizar diversos renglones de desempeño de la red.
2. El número de clientes en la red y la demanda de recursos puede llegar a ser muy grande en iWMN. Las limitantes de ancho de banda, así como la equidad en la distribución del mismo, son un desafío para cualquier protocolo de encaminamiento en esta arquitectura de red.
3. El medio inalámbrico presenta asimetrías, es susceptible a interferencias y atenuaciones que afectan de manera directa y variable la calidad de los enlaces. La probabilidad de degradación de los enlaces es alta y la reacción oportuna ante estos eventos es otra de las dificultades a enfrentar.
4. Dado que gran parte del tráfico en iWMN se concentra en las regiones más cercanas a los portales de la malla (MPPs), la generación de zonas con una alta densidad de tráfico es inminente. Un protocolo de encaminamiento debe ser capaz de distribuir eficientemente el tráfico dentro de la red y minimizar la creación de *cuernos de botella*.
5. La movilidad y su impacto en la cadencia de la transmisión/recepción de paquetes de datos, exige al protocolo de encaminamiento capacidad para mantener la conectividad y minimizar la latencia de mantenimiento y reacción ante cambios en la topología de la red.

4.5.2. Ventajas que presentan las iWMN

Las iWMN ofrecen un conjunto de ventajas que pueden ser aprovechadas por los protocolos de encaminamiento con objeto de mejorar el desempeño de la red. Enumeramos a continuación las más significativas:

1. El medio de difusión permite que la información de un nodo sea recibida por diversos nodos dentro del rango de transmisión con el mismo costo. De tal forma que, el número de receptores puede aumentar exponencialmente por cada retransmisión y la posibilidad de utilizar múltiples trayectorias podría exponenciar la tasa de envío.
2. La estabilidad del *backbone* de la red debido a la movilidad limitada de los nodos que lo componen, así como la ausencia de limitantes energéticas y de procesamiento, permiten diseñar protocolos de encaminamiento más robustos y eficientes.
3. La modulación adaptativa de los estándares 802.11 b/g permite transmitir a distintas velocidades como función del BER (*bit error rate*). Un protocolo de encaminamiento puede aprovechar esta propiedad para transmitir a tasas óptimas dentro de una trayectoria, optimizando el retardo de extremo a extremo y el BER en la trayectoria.
4. La posibilidad de contar con varias interfaces inalámbricas y distintos canales de transmisión, permite realizar transmisiones concurrentes. Esto podría incrementar el número de alternativas de encaminamiento y por lo tanto, la capacidad y el *throughput* de la red.

4.5.3. Propiedades ideales de un protocolo para iWMN

Teniendo en cuenta las dificultades y ventajas que un protocolo de encaminamiento afronta en iWMN, así como las necesidades básicas de las aplicaciones que residirán en la red, se pueden enumerar un conjunto de propiedades ideales que un protocolo de encaminamiento para iWMN debe tener [16]:

1. El ancho de banda es uno de los recursos más preciados en el medio inalámbrico de iWMN, por lo que es necesario un manejo eficiente y equitativo de éste, así como la utilización de técnicas para incrementar inteligentemente su uso.
 2. Un protocolo de encaminamiento debe ser capaz de aprovechar la existencia de múltiples trayectorias en iWMN para reaccionar oportunamente ante cualquier falla de la red.
 3. El uso de métricas de encaminamiento para la selección de rutas óptimas deberá de responder a los escenarios de aplicación de las iWMN. El uso de métricas que contemplen los efectos del medio inalámbrico son actualmente la propuestas más interesante para WMN, por ejemplo: la métrica *Expected Transmission Count* (ETX) se define como el número de transmisiones de la capa MAC necesarias para entregar correctamente un paquete de datos a través de un enlace inalámbrico, la métrica *Expected Transmission Time* (ETT) es una extensión de ETX, pues además contempla el impacto de la heterogeneidad de ancho de banda de los enlaces inalámbricos, por otro lado la métrica *Weighted Cumulative Expected Transmission Time* (WCETT) se basa en la métrica ETT y considera la interferencia de flujos internos mientras que explota las propiedades multi radio y multi tasa de los sistemas inalámbricos, finalmente la métrica *Per hop*
-

Round Trip Time refleja el retardo bidireccional en un enlace inalámbrico, a través de un mensaje de prueba se determina el retardo entre un par de nodos [25].

4. El desempeño de un protocolo de encaminamiento no debe alterarse a medida que el tamaño de la red aumenta. La escalabilidad de la red es un factor que recae específicamente en los protocolos de encaminamiento.
5. Dado que el ancho de banda es un recurso escaso, un protocolo de encaminamiento debe reducir sustancialmente la carga de señalización que introduce a la red para minimizar la sobreutilización del recurso.
6. Existen ciertas regiones de la red que por su naturaleza se sobrecargan, un protocolo de encaminamiento deberá ser capaz de redirigir el tráfico para utilizar de manera más eficiente los recursos de la red.
7. Un protocolo de encaminamiento deberá evitar la construcción de bucles.
8. Un protocolo de encaminamiento para iWMN debe minimizar los efectos negativos que induce la movilidad de los usuarios.

El borrador del estándar para esta arquitectura de red (Draft IEEE 802.11s) propone el uso del protocolo *Hybrid Wireless Mesh Protocol* (HWMP) [10]. Sin embargo, una de las soluciones mayormente utilizadas en esta arquitectura de red es la utilización de los protocolos de encaminamiento diseñados para redes *ad hoc*. Esto a pesar de las diferencias significativas entre arquitecturas de red, que van desde sus distintas propiedades hasta las ventajas y desventajas que los protocolos de encaminamiento enfrentan en cada una de estas arquitecturas. A continuación enumeramos las diferencias más significativas entre estas arquitecturas.

4.5.4. Principales diferencias entre redes *ad hoc* e iWMN

Podemos resumir las diferencias entre redes *ad hoc* e iWMN de la siguiente forma:

1. Una iWMN organiza jerárquicamente a los nodos que componen el backbone; es decir, determinado grupo de nodos tiene responsabilidades específicas; mientras que en una red *ad hoc* no existe tal distinción.
 2. Una iWMN actúa como una extensión inalámbrica de la red cableada y es capaz de intercambiar información entre ambas arquitecturas, mientras las redes *ad hoc* son entidades aisladas con el único fin de compartir información entre los usuarios de la red.
 3. La densidad de tráfico en una iWMN se distribuye de manera sesgada, pues éste aumenta en los nodos cercanos a los MPPs (cuellos de botella) afectando el desempeño de la red. Mientras que en las redes *ad hoc* el tráfico puede asumirse uniformemente distribuido.
-

4. Los flujos de datos en iWMN poseen distintos requerimientos de calidad de servicio, pues normalmente son flujos desde y hacia Internet, cosa que no sucede en las redes *ad hoc*.
5. Los MAP soportan una gran cantidad de clientes, a diferencia de las redes *ad hoc* donde cada nodo posee un conjunto reducido de nodos vecinos. Por ende, el tráfico en una iWMN se ve incrementado en comparación con el nivel de tráfico presente en una red *ad hoc*.
6. Los cambios dinámicos de la topología de una iWMN son menos frecuentes que aquellos cambios en las redes *ad hoc*.
7. Una red *ad hoc*, por definición, es una red carente de una infraestructura de comunicaciones, mientras que una iWMN cuenta con una infraestructura esencial para su funcionalidad: el *backbone* de la red.
8. Todos los nodos que componen una red *ad hoc* poseen la habilidad de moverse libremente, mientras que en una iWMN, la movilidad es una propiedad heredada solo a los clientes de la red.
9. La movilidad de los nodos de una red *ad hoc*, impone limitantes de energía así como de procesamiento y de almacenamiento de información. En una iWMN, los nodos que componen el *backbone* de la red no sufren de estas limitaciones.

La adopción de los protocolos de encaminamiento diseñados para redes *ad hoc* en iWMN ha generado dudas justificadas sobre su desempeño [35], y éstas han sido parcialmente contestadas a través de diversos trabajos de investigación. Sin embargo, existen parámetros de evaluación, escenarios de simulación y adecuaciones a los protocolos que no han sido atendidos en la literatura [41]. La evaluación de desempeño de los diversos esquemas de encaminamiento que proponemos, permitirá obtener resultados que justifiquen de manera clara las propiedades que debe poseer un protocolo de encaminamiento específico para iWMN. Si bien el efecto de los protocolos específicos para redes *ad hoc* en iWMN podría no ser óptimo, su evaluación resulta necesaria para generar fundamentos que permitan adecuar las características propias de cada esquema de encaminamiento, en una propuesta de diseño adecuada para iWMN.

Capítulo 5

Estado del arte

El diseño, estudio y mejora de protocolos de encaminamiento para redes inalámbricas *ad hoc* ha sido una labor atendida con intensidad en los últimos años. El número de protocolos de encaminamiento propuestos para esta arquitectura de red ha crecido considerablemente [22], y la evaluación del desempeño de las propuestas más destacadas ha sido una labor igualmente estudiada, e.g. [26, 27, 28, 29, 30]. Esta ardua evaluación de los protocolos de encaminamiento para redes *ad hoc*, ha dado paso a la creación de un marco general de evaluación [31]. En este marco de evaluación se propone un conjunto de medidas de desempeño y parámetros que garantizan un contexto de evaluación confiable.

El caso de la evaluación de protocolos de encaminamiento para redes inalámbricas en malla (WMN) es particularmente especial. Una primera aproximación que describe claramente el problema del encaminamiento en WMN, y sintetiza algunas propuestas para atender este problema, ha sido presentado por Josep *et. al* [16] y complementada por Kowalik *et. al* [32]. En ambos trabajos se detallan las características deseables de un protocolo de encaminamiento, y además se analizan y discuten diversas técnicas de encaminamiento para WMN. Ahora bien, al hablar del proceso de evaluación de protocolos de encaminamiento para WMN, notamos que ésta es una labor incipiente y, si bien ha sido realizada a través de diversos trabajos de investigación, aún existen distintos parámetros de evaluación, escenarios, y patrones de tráfico que no han sido considerados conjuntamente en un marco de evaluación. Por ejemplo, los trabajos presentados por Zakrewska *et. al* [35, 41] presentan un conjunto de parámetros de evaluación muy significativos, sin embargo el escenario de evaluación que utilizan no es representativo de una iWMN sino de una cWMN, en contraste, Gerla *et. al* presentan un escenario muy representativo de una hWMN pero el conjunto de parámetros de evaluación no es tan detallado como el propuesto por Zakrewska *et. al*. En gran medida, los patrones de tráfico que han sido encontrados en la literatura también varían de un trabajo a otro, estos patrones de tráfico son comúnmente fuentes constantes (*Constant Bit Rate-CBR*) con diferentes tasas de transmisión. Por ejemplo Gerla *et. al* [39] y Ashraf *et. al* [38] utilizan tasas de transmisión bajas de 4 y 3 paquetes por segundo respectivamente mientras que Bose *et. al* [44] propone tasas de transmisión elevadas que oscilan entre 20 y 80 paquetes por segundo.

Dado que existen pocas propuestas de encaminamiento específicas para iWMN, tales como el esquema híbrido *Hybrid Wireless Mesh Protocol* (HWMP), su evaluación es una labor recientemente realizada [33, 34] y aún no existen resultados contundentes que avalen la superioridad del desempeño inducido por esta propuesta. Una de las tendencias actuales para atender el problema del encaminamiento en iWMN es utilizar los protocolos de encaminamiento diseñados para redes *ad hoc* en esta novedosa arquitectura. Sin embargo, basados en las diferencias entre las arquitecturas de red así como en los diferentes objetivos que persigue cada una de éstas, se cree que el desempeño de esta solución podría no ser el óptimo [35]. Para despejar éstas dudas, se han encontrado en la literatura diversas propuestas de evaluación para el encaminamiento en WMN. No obstante, la evaluación de estos protocolos se ha centrado principalmente en dos categorías importantes de las WMN, las cWMN y hWMN; debido a que los protocolos de encaminamiento diseñados para redes *ad hoc* pueden ser adaptados en estas arquitecturas sin requerir de cambios en sus mecanismos de funcionamiento; tal y como es presentado por Pirzada *et. al* [36, 37]. Podemos afirmar que la evaluación de protocolos de encaminamiento para iWMN se encuentra en su etapa incipiente.

Al momento de desarrollar este trabajo de investigación, la evaluación de protocolos de encaminamiento diseñados para redes *ad hoc* en iWMN, no ha sido encontrada en la literatura, de forma tal que podemos afirmar que este es un trabajo pionero en esta temática. Aunque existen trabajos que ofrecen una aproximación interesante, tal y como el propuesto por Ashraf *et al.* [38] en donde la evaluación de los protocolos de encaminamiento se realizan particularmente sobre el *backbone* de la red; éste no considera los efectos que produce la movilidad de los usuarios. Encontramos también que las evaluaciones propuestas por Gerla *et al.* [39] y Singh *et al.* [40], ofrecen resultados importantes sobre un escenario de simulación representativo de hWMN; un conjunto de parámetros comunes y particularmente estudian el desempeño ofrecido por los protocolos *Ad hoc On Demand Distance Vector* (AODV) y *Optimized Link State Routing Protocol* (OLSR); dejando de lado protocolos más populares. Tras la revisión de la literatura, resulta notorio que gran parte de los trabajos realizados sobre evaluación de desempeño de protocolos de encaminamiento diseñados para redes *ad hoc* en WMN, se ha centrado en los protocolos más populares, específicamente: *Ad hoc On Demand Distance Vector* AODV, *Dynamic Source Routing* (DSR), *Optimized Link State Routing* (OLSR) y *Destination Sequenced Distance Vector* (DSDV), dado que son representantes importantes de los esquemas de encaminamiento reactivo y proactivo. Existen además diversas propuestas de modificación a dichos esquemas, por ejemplo, Pirzada *et. al* [36, 42], quien propone adecuar esquemas multitrayectoria a los protocolos DSR y AODV, o bien la propuesta de Tingrui *et. al* [43] que sugiere inducir un comportamiento jerárquico al protocolo AODV para ser utilizado en una arquitectura híbrida de WMN.

El escenario de evaluación de un protocolo de encaminamiento es muy importante para obtener resultados significativos. Tanto Zakrzewska *et al.* [35, 41] como Bose *et al.* [44], utilizan un escenario de evaluación donde no se contempla el efecto de los portales de la malla (MPPs) en el desempeño de iWMN, no obstante, el conjunto de parámetros de evaluación

resulta ser muy completo para la evaluación de los diversos protocolos de encaminamiento. En [39, 45, 33], los autores muestran la evaluación de protocolos poco convencionales (*Hybrid Wireless Mesh Protocol* (HWMP), *Dynamic MANET On-demand routing protocol* (DYMO) y *Optimized Link State Routing Protocol* (OFLSR)) que, si bien son interesantes, no son comparados conjuntamente con los protocolos más populares para redes *ad hoc*. Sin embargo, consolidan claramente un escenario de simulación significativo que, conjuntamente con los trabajos analizados, nos permite diseñar un escenario de evaluación válido para nuestra investigación. Yu *et. al* [46] proponen la evaluación de desempeño a través de la transmisión de un archivo utilizando una sesión de tráfico que emula el *File Transfer Protocol* (FTP) en una hWMN. Si bien la evaluación es llevada a cabo en un escenario específico para hWMN, sus métricas de desempeño resultan ser complementarias para nuestro proyecto.

Finalmente en [47] y [48] los autores proponen evaluar el desempeño de algunos protocolos de encaminamiento en la implementación real de una WMN con características particulares. La primera aproximación propone un escenario muy apegado a la implementación funcional de una iWMN y sugiere un protocolo de encaminamiento modificado, *Multi-Radio Link-Quality Source Routing* (MR-LQSR). Mientras que en [48], los autores realizan la evaluación del protocolo AODV en la implementación de una hWMN. La información obtenida a través del proceso de revisión del estado del arte sustenta claramente los objetivos planteados para este proyecto, los cuales son detallados en la Sección 1.1. Nuestra propuesta conjunta los rasgos más significativos de los trabajos de evaluación destacados del estado del arte, el objetivo es generar una evaluación confiable y comparable con las diversas propuestas que hemos analizado. Esto sustenta nuestra propuesta y valida el contexto de nuestra evaluación. En lo que resta de este trabajo, mostramos de manera detallada el proceso de evaluación que hemos realizado. Este proceso se compone de: un escenario de simulación, un conjunto de medidas de desempeño, nuestra propuesta de modificación a los esquemas de encaminamiento propuestos y finalmente los resultados de la evaluación.

Capítulo 6

Escenario de evaluación

6.1. Introducción

La evaluación de desempeño de protocolos de encaminamiento a través de simulaciones computacionales, requiere de un conjunto de medidas de desempeño que muestren claramente los efectos que cada esquema de encaminamiento induce en la red. Además, el escenario de simulación debe representar, de manera general, los detalles de una posible implementación del sistema estudiado. En este capítulo detallamos las características del escenario de evaluación propuesto así como las medidas de desempeño que hemos considerado como las más representativas para los objetivos de este trabajo. Del mismo modo pormenorizamos algunas de las características más relevantes del simulador de eventos discretos seleccionado para este proyecto de investigación: *Network Simulator (ns2)* en su versión 2.34 [49], la cual ha sido desarrollada bajo la licencia de software libre y disponible a partir de junio de 2009.

6.2. Simulador de eventos discretos *ns2*

El simulador de eventos discretos *ns2* ha ganado prestigio dentro de diversas áreas de la investigación en redes de datos. Esta herramienta es el resultado de los esfuerzos conjuntos de investigadores y desarrolladores, y es administrada principalmente por la universidad de Berkeley. El simulador *ns2* ofrece herramientas útiles para la simulación de eventos en el área de redes, pues emula los eventos que suceden, desde la capa física (PHY) hasta la capa de aplicación, durante la transmisión de datos. El simulador *ns2* está escrito en lenguaje C++ y ofrece al usuario un intérprete de instrucciones OTcl. El usuario del simulador es el encargado de definir, a través de un *script* escrito en OTcl, el escenario de simulación, las fuentes de tráfico en la red, los protocolos que serán utilizados, entre otras tantas opciones. Este *script* es interpretado por el simulador a través del intérprete OTcl, lo cual le permite crear objetos así como agendar eventos e interacciones entre éstos. Los resultados de la simulación son entregados en un archivo de trazas que muestra los eventos sucedidos durante el tiempo de simulación. Este archivo puede ser procesado gráficamente o de manera estadística, para obtener información relevante para los objetivos de un proyecto en particular. La Figura 6.1

ilustra el procedimiento de simulación en *ns2*. Dada la importancia de este simulador, y su utilidad para múltiples investigaciones con objetivos similares a los que se persiguen en nuestro trabajo, es por lo que hemos seleccionado la versión más reciente de este software (ver. 2.34 / 2009) como la herramienta de simulación para este proyecto.

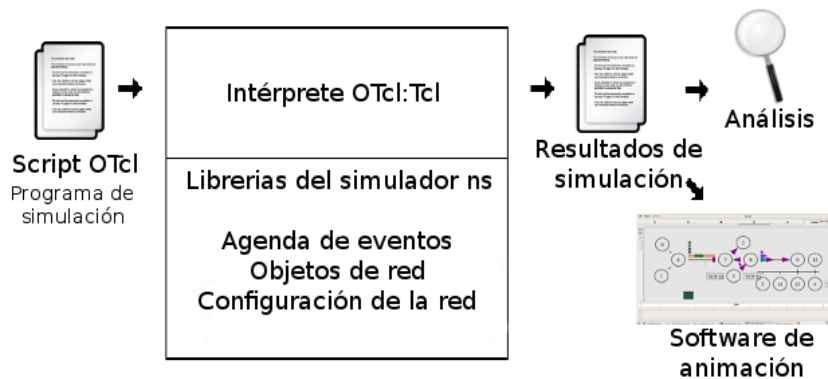


Figura 6.1: Proceso de simulación con *ns2*.

Desafortunadamente, *ns2* aún no ha integrado totalmente las funciones necesarias para cumplir con los objetivos planteados en este proyecto. La simulación de WMN es un trabajo incipiente para diversos simuladores y *ns2* no es la excepción. Sin embargo, una de las virtudes de *ns2* es la posibilidad de modificar o agregar código de programación, que permita ajustar su comportamiento. Este es otro motivo por el cual hemos seleccionado esta herramienta de simulación.

6.3. Escenario de simulación

Uno de los elementos más importantes para la evaluación de los protocolos de encaminamiento propuestos, es el *escenario de simulación*. Basados en los escenarios más destacados de la literatura, tales como los presentados por Zakrzewska *et al.* [35, 41], Gerla *et al.* [39] y Ashraf *et al.* [38], hemos conjuntado algunas de las propiedades más significativas de cada propuesta para integrar nuestro escenario de simulación, de forma tal que éste sea lo más representativo posible. El escenario de simulación propuesto cuenta con las siguientes características: para representar la arquitectura del *backbone* de una iWMN utilizamos una formación de nodos en rejilla. Este arreglo está integrado por 49 nodos estáticos (N1 - N49) organizados de la siguiente forma: 24 MAPs (*Mesh Access Points*), 24 MPs (*Mesh Points*) y 1 MPP (*Mesh Portal Point*). Estos nodos se acomodan intercaladamente formando una configuración cuadrada de 7 x 7 nodos, como se muestra en la Figura 6.2. Esta rejilla está centrada en un área de simulación de 1600m x 1600m. El número de STAs (*Mobile Stations*) que utilizan el *backbone*, varía para cada conjunto de simulaciones con los siguientes valores {10, 30, 50, 100 y 150 STAs}. La posición inicial de los usuarios móviles en el escenario de

simulación la definimos aleatoriamente. La distribución de los nodos del *backbone* nos permite crear regiones de cobertura que cubren el escenario de simulación en su totalidad, pues el alcance de transmisión/recepción de cada nodo del *backbone* es de 250m.

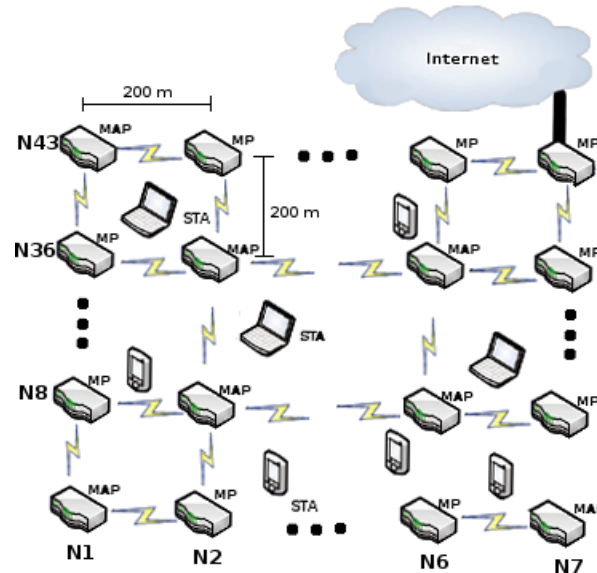


Figura 6.2: Escenario de simulación.

6.4. Tráfico y conectividad en la red

La generación de tráfico en la red, es un elemento trascendente para la evaluación que se persigue en este trabajo de investigación. De acuerdo a diversos resultados de investigación que tratan el problema del modelado del tráfico en Internet, y particularmente los trabajos presentados por Barford-Crovella [50] y Yang [51], se puede concluir que el comportamiento de los usuarios que utilizan Internet genera tráfico de datos en ráfagas. Este comportamiento puede ser modelado a través de un patrón ON/OFF como el que se muestra en la Figura 6.3. Basados en las apreciaciones de la literatura, hemos resuelto modelar las fuentes de tráfico con un comportamiento que se ajusta al modelo encendido/apagado (*ON/OFF*), con un tiempo promedio de transmisión de $400ms$, basados en el modelo de tráfico propuesto por [50, 51], entre otros. El tiempo inter paquete (*Pt - Inter Packet time*) depende directamente de la tasa de transmisión promedio seleccionada y ésta se incrementará gradualmente de acuerdo al siguiente conjunto de valores: {10, 30, 50, 100, 150, 200, 250 y 300 kbps}. Cada nodo seleccionará aleatoriamente un tiempo inicial de transmisión dentro de los primeros 20 segundos de simulación y del mismo modo elegirá un tiempo final de transmisión dentro de los últimos 20 segundos de simulación.

Existen dos tipos de conexiones en una iWMN, una es entre un par de usuarios móviles que desean intercambiar información, y la otra corresponde a la conexión que se realiza entre un

usuario móvil y la red cableada, ej. Internet. Para cada simulación se generarán conexiones a través de una variable aleatoria que representa un experimento de *Bernoulli*, con una probabilidad de 0.8 se establecerá conectividad entre usuarios móviles y la red cableada, mientras que con una probabilidad de 0.2 la conectividad se realizará entre un par de STAs, asumiendo que un porcentaje mayor de las conexiones en la red se realizará entre los usuarios móviles y la red cableada. En la capa de transporte se utilizará el protocolo *User Datagram Protocol* (UDP) y el tamaño de cada paquete de datos será de 512 bytes, tal y como es utilizado por Zakrzewska *et. al* [35] Gerla *et. al* [39] y Bose *et. al* [44], entre otros. Todos los nodos que componen la red utilizarán el estándar IEEE 802.11b, con las funciones de acceso al medio provistas por el mecanismo *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA).

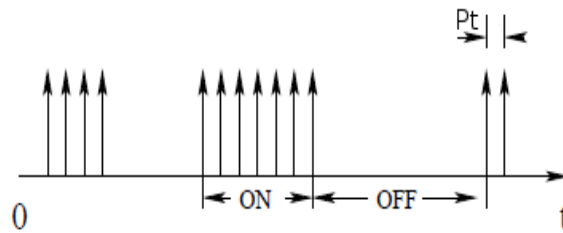


Figura 6.3: Modelo de tráfico ON/OFF

6.5. Modelo de movilidad ‘*Random Waypoint*’

La movilidad de cada STA es importante, pues influye directamente en la topología de la red y por ende en el desempeño de la misma. Cada STA ha sido configurada para utilizar el modelo de movilidad *Random Waypoint*, dado que este es uno de los modelos de movilidad que ha sido adoptado sistemáticamente por diversos trabajos de investigación. Bajo este modelo cada nodo inicia en una posición aleatoria (x_o, y_o) y elige del mismo modo un destino (x_d, y_d) , al cual se moverá con una velocidad aleatoria, uniformemente distribuida, entre (V_{min}, V_{max}) . Después de alcanzar el punto (x_d, y_d) cada nodo realiza una pausa durante un tiempo definido (*pause time*) y una vez que el tiempo de espera expira, se repite de nueva cuenta el proceso de movilidad descrito, es decir $x_o = x_d$ y $y_o = y_d$ [52]. Para el escenario de simulación propuesto se ha elegido el siguiente rango de variación de la velocidad de traslación, $[0, 10) m/s$. Cada simulación fue realizada durante un periodo de tiempo de $1000s$, con el objetivo de minimizar el efecto negativo que es inducido por este modelo de movilidad [53], el cual consiste en un decremento gradual de la velocidad promedio de los nodos a medida que incrementa el tiempo de simulación.

6.6. Modelo de propagación

El modelo de propagación es usado para estimar la potencia de la señal recibida por cada paquete de datos que es enviado a través de un enlace inalámbrico. La elección de un modelo de propagación, para un ejercicio de simulación, influye significativamente en los resultados obtenidos y en sus tiempos de ejecución. La idea principal de un modelo de propagación eficaz, es reducir significativamente la complejidad del modelo para obtener resultados de manera rápida y confiable. El simulador *ns2* cuenta con tres modelos de propagación predefinidos: el modelo *free-space*, el modelo *two-ray-ground* y el modelo *Shadowing*. Para la experimentación de este trabajo de investigación se ha optado por utilizar uno de los modelos mayormente empleados dentro de la literatura, el modelo *two-ray-ground*. En este modelo, la potencia recibida es expresada en la Ecuación 6.1. En esta ecuación, la potencia recibida P_r depende de la potencia de transmisión P_t , de la ganancia de las antenas del receptor y transmisor (G_r y G_t), de la distancia entre ambos nodos d , de un coeficiente de pérdidas L , de la longitud de onda λ y finalmente de las alturas de las antenas del receptor y transmisor (h_r y h_t) [54].

$$P_r = \begin{cases} \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot h_t^2 \cdot h_r^2}{d^4 \cdot L} & \text{si } d > \frac{4\pi \cdot h_t \cdot h_r}{\lambda} \\ \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi \cdot d)^2 \cdot L} & \text{si } d \leq \frac{4\pi \cdot h_t \cdot h_r}{\lambda} \end{cases} \quad (6.1)$$

6.7. Medidas de desempeño

Retomando algunas medidas de desempeño propuestas en buen número de los trabajos revisados en la literatura (e.g. Zakrzewska *et al.* [35, 41]), hemos conjuntado las medidas de desempeño más representativas y agregamos un análisis de la distribución del tráfico y pérdidas dentro del *backbone* de la red. Para evaluar el desempeño de los protocolos de encaminamiento propuestos utilizamos las siguientes siete medidas de desempeño:

- **Throughput**

El *throughput* se define como la cantidad total de información que es recibida en los nodos destino por unidad de tiempo. En este caso

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Información}}{\text{Tiempo de simulación}} [\text{kbps}] \quad (6.2)$$

- **Tasa promedio de entrega**

La *tasa promedio de entrega* es la fracción de paquetes que llegan a su destino por el número total de paquetes enviados en la red.

$$\text{Tasa de entrega} = \frac{\text{Paquetes recibidos}}{\text{Paquetes enviados}} \times 100 [\%] \quad (6.3)$$

- **Retardo promedio de extremo a extremo**

El *retardo promedio de extremo a extremo* se expresa como el tiempo promedio que

requieren todos los paquetes de datos que han sido entregados a su destino. Donde el retardo de el paquete i -ésimo se expresa como $Tr_i - Ts_i$. Asumiendo j paquetes entregados en su destino.

$$Retardo = \frac{\sum_j Tr_j - Ts_j}{Paquetes\ entregados} [s] \quad (6.4)$$

- **Carga de señalización**

La *carga de señalización* del protocolo es la razón entre el número de paquetes de control enviados, por el número total de paquetes enviados. poner acentos en formulas latex

$$Señalización = \frac{Paquetes\ de\ señalización}{Número\ total\ de\ paquetes\ enviados} \times 100[\%] \quad (6.5)$$

- **Distribución del tráfico y de las pérdidas**

La *distribución del tráfico y de las pérdidas* representa la medida promedio de paquetes enviados y perdidos por cada uno de los nodos que conforman el *backbone*.

- **Latencia**

La *latencia* representa el tiempo promedio que le toma a los protocolos de encaminamiento reactivos para realizar el descubrimiento de una trayectoria de comunicaciones.

Capítulo 7

Evaluación del protocolo AODV

7.1. Protocolo Ad hoc On Demand Distance Vector

Ad hoc On Demand Distance Vector (AODV) fue desarrollado por Perkins-Royer en 1999 y toma como punto de partida el protocolo DSDV también concebido por Perkins-Bhagwat cuatro años atrás. AODV pertenece a la clasificación de protocolos de encaminamiento reactivos, de tal forma que el procedimiento de búsqueda y selección de trayectorias de comunicación sólo se realiza en el momento en el que se requiere transmitir información y no se tiene conocimiento de una ruta para comunicarse con el nodo destino. AODV utiliza números de secuencia con el fin de mantener actualizada la información de encaminamiento. El número de secuencia, es un valor entero que se incrementa monótonamente por cada paquete de señalización enviado por un nodo. Para complementar este mecanismo de identificación de paquetes de señalización, existe el denominado identificador único que posee cada uno de los nodos que componen la red. La combinación de estos dos valores permite distinguir información de encaminamiento actualizada y descartar aquella que no lo es, esto impide la creación de bucles en las rutas de encaminamiento.

AODV basa su funcionamiento en el algoritmo Vector-Distancia Bellman-Ford y utiliza el esquema de encaminamiento salto-tras-salto (*hop by hop*), en el cual, cada nodo de la ruta de comunicaciones es encargado de determinar el siguiente “salto” que debe realizar el paquete de datos para llegar a su destino, así los nodos no necesitan tener conocimiento completo de la topología de la red. AODV utiliza un mecanismo de descubrimiento de ruta basado en el esquema petición/respuesta. En este esquema AODV envía en modo de difusión (*broadcast*) un paquete de descubrimiento de trayectorias, similar al utilizado en el protocolo DSR, que inunda la red y tiene como objetivo llegar hasta el nodo destino, o bien a algún nodo intermedio que conozca una ruta para comunicarse con el nodo destino. La respuesta al paquete de descubrimiento será enviada en modo *unicast* hasta el nodo fuente y así se podrá establecer una ruta de comunicaciones. El protocolo AODV almacena la información de encaminamiento en tablas de ruteo. Cada nodo de la red administra su propia tabla de ruteo y en ésta se almacena una sola entrada, de manera temporal, para alcanzar un nodo

destino.

7.1.1. Procedimiento de descubrimiento de ruta

El procedimiento de descubrimiento de ruta se inicia en el momento en el que un nodo requiere transmitir información y desconoce una ruta para hacer llegar esta información hasta el nodo destino. Para descubrir una trayectoria que comunique al nodo fuente con el nodo destino, el protocolo AODV utiliza dos paquetes de señalización: el paquete de solicitud de ruta (RREQ - *Route request*) y el paquete de respuesta de ruta (RREP - *Route reply*). Éstos funcionan de la siguiente forma:

- RREQ - (*Route Request*)

En el momento en el que un nodo fuente desea transmitir información a un nodo destino y desconoce una ruta para hacerlo, un paquete RREQ es enviado en modo difusión, inundando la red hasta hallar al nodo destino o bien hasta alcanzar un nodo intermedio con una ruta válida para alcanzar el destino. En este paquete se incluye el identificador único del nodo que envía el paquete así como el número de secuencia correspondiente y el identificador del nodo destino. En el momento en el que un nodo recibe un paquete RREQ, se verifica que éste no haya sido recibido previamente a través del análisis de los identificadores en el paquete. Si el paquete no ha sido recibido previamente, el nodo receptor procesará dicho paquete. Cada nodo que procesa un RREQ, y desconoce una trayectoria para el nodo destino, reexpide el RREQ y almacena de manera temporal información para el establecimiento de la trayectoria de vuelta, es decir, almacena el identificador del nodo previo que envió ese paquete. La Figura 7.1 muestra una red compuesta por nueve nodos inalámbricos. En este ejemplo, el nodo N1 desea comunicarse con el nodo N9 y desconoce una ruta para establecer comunicación. El nodo N1 crea un paquete RREQ, en él coloca, principalmente, su identificador, su respectivo número de secuencia y la dirección del nodo destino. Este paquete es enviado a sus nodos vecinos en modo *broadcast*. Los nodos N2 y N3, al recibir el paquete RREQ, buscan en sus tablas de ruteo un camino para comunicarse con el nodo N9, dado que en este ejemplo dichos nodos lo desconocen, almacenan la información correspondiente al RREQ recibido, id del nodo origen, número de secuencia, y nodo previo que envió el paquete RREQ, en este caso N1, y finalmente reexpiden el paquete a sus nodos vecinos. Al almacenar información sobre el nodo previo que ha enviado el RREQ, cada nodo participa en la creación de una trayectoria de regreso/vuelta por donde viajará la respuesta a la solicitud de ruta. Si un nodo recibe en más de una ocasión un mismo paquete RREQ, este paquete se descarta para evitar la creación de bucles en la trayectoria.

- RREP - (*Route Reply*)

Cuando el paquete RREQ llega al nodo destino, o bien a un nodo intermedio que conoce una ruta válida para llegar al nodo destino, éste último envía un paquete de respuesta RREP de manera *unicast* a través de la trayectoria de regreso almacenada previamente en los nodos intermedios, asumiendo un comportamiento bidireccional de

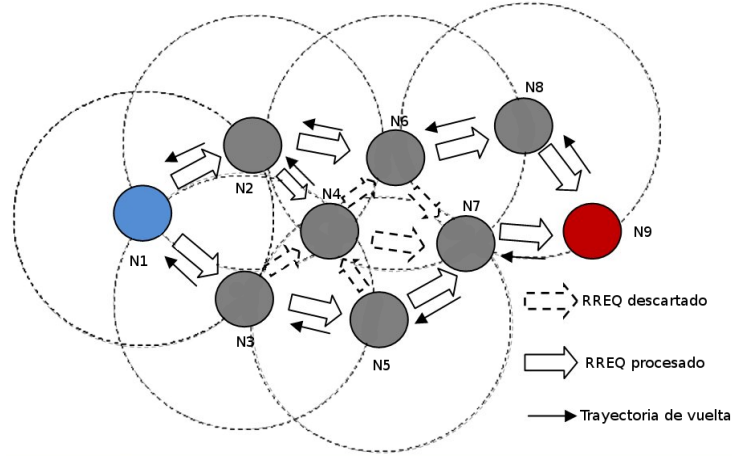


Figura 7.1: Mecanismo de inundado de la red (RREQ).

los enlaces inalámbricos en la trayectoria. Como se aprecia en la Figura 7.2, en este ejemplo asumimos que el nodo destino es quien envía el paquete RREP a la solicitud de ruta. A medida que el paquete RREP es enviado hacia el nodo fuente, los nodos intermedios almacenan la ruta por donde viajará la información, con este procedimiento se logra establecer la ruta final de comunicaciones. En caso de que el nodo fuente reciba varios RREP, el mecanismo de selección de ruta tiene como objetivo de optimización minimizar el número de saltos en la trayectoria. De este modo, en caso de existir diversas alternativas de encaminamiento, el nodo fuente seleccionará aquella trayectoria con el menor número de saltos necesarios para comunicarse con el nodo destino.

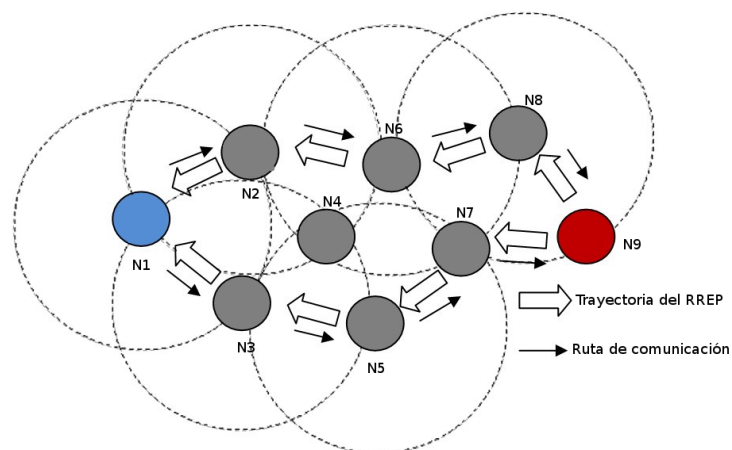


Figura 7.2: Mecanismo de respuesta de ruta (RREP).

7.1.2. Mecanismo de mantenimiento de ruta

Como parte del mecanismo de mantenimiento de la trayectoria de comunicaciones, AODV utiliza dos paquetes de señalización específicos para este fin: paquetes de conectividad local (HELLO) y paquetes de error de ruta (RERR - *Route Error*). Los paquetes HELLO son utilizados para el mantenimiento de la conectividad local de un nodo; este paquete es enviado periódicamente por todos los nodos de la red para indicar su presencia a los nodos vecinos y para validar el enlace de comunicaciones que existe entre ellos. Cuando un nodo deja de recibir estos mensajes por parte de algún nodo vecino, se puede asumir que el enlace ha dejado de funcionar. En el momento en el que un nodo detecta esta eventualidad, éste envía a sus nodos vecinos un paquete RERR en el que se advierte del fallo en el enlace. Los nodos que reciben el paquete de error lo propagan hacia los nodos cuyas rutas podrían ser afectadas. Cada nodo etiqueta como inválida la ruta que se vea afectada por este error en el enlace.

7.2. Propuesta de mejora al protocolo de encaminamiento AODV

El mecanismo de descubrimiento de rutas, de los protocolos de encaminamiento para redes *ad hoc*, fue diseñado para ser ejecutado de manera distribuida en una arquitectura de red “plana” como se describe en la Sección 2.2. Para evaluar el desempeño de estos protocolos en iWMN, es necesario conservar su funcionamiento distribuido y realizar algunas modificaciones que restrinjan el procedimiento de búsqueda y construcción de rutas. El objetivo de estas restricciones, mostradas en la Figura 7.3, es evitar la selección de rutas de encaminamiento que violen las reglas de jerarquía de las iWMN, es decir: las rutas de encaminamiento no pueden ser establecidas entre usuarios móviles (STAs), tampoco entre STAs y MPs (*Mesh points* ni directamente entre STAs y el portal de la malla (MPP). La única forma en la que las STAs pueden acceder al *backbone* de la red es a través de puntos de acceso (MAPs) y del mismo modo, el *backbone* solo es capaz de enviar información a las STAs a través de los MAPs.



Figura 7.3: Comunicaciones inválidas para la construcción de rutas en iWMN.

Algoritmo propuesto para la creación de rutas en un ambiente jerárquico utilizando AODV

Para implementar las restricciones propuestas, es necesario modificar el diseño clásico del protocolo AODV. Durante la etapa de descubrimiento de ruta se ha implementado un procedimiento que permita descartar paquetes RREQ, el objetivo es evitar la construcción de rutas de comunicación inválidas en la jerarquía de iWMN. Este mecanismo utiliza un identificador propio para cada nodo que compone la red (*my_id*), conjuntamente con el identificador del nodo previo que ha enviado (*prev_id*) el paquete RREQ y el identificador del nodo destino (*dest_id*). Para evitar la construcción de rutas inválidas, cada nodo debe determinar su posición jerárquica así como sus funciones dentro de la red. En virtud del conocimiento de su propio identificador así como del identificador tanto del nodo destino como del nodo previo, adjuntados en cada paquete RREQ, cada nodo puede ser capaz de determinar si dicho paquete puede ser procesado o descartado. La secuencia de este procedimiento se detalla en el Algoritmo 1, en éste se muestran las restricciones de procesamiento de paquetes RREQ que permiten crear rutas válidas para iWMN. Tras la implementación de estas modificaciones, el paso siguiente consiste en realizar varias simulaciones que permitan determinar los efectos de desempeño que son inducidos con nuestra propuesta. Durante cada conjunto de simulaciones se analiza el desempeño del protocolo de encaminamiento como función de la tasa de transmisión promedio de las STAs, así como del número de éstas en la red. Cada resultado es analizado a través de *scripts*, programados en lenguaje AWK, que permiten realizar el procesamiento estadístico de cada traza de simulación. Los resultados son presentados a continuación.

Algoritmo 1 . Procedimiento de desestimación de paquetes RREQ.

Entrada: Paquete RREQ recibido, identificadores del paquete: *my_id*, *prev_id* y *dest_id*

- 1: **si** *my_id* = *MP* **y** *prev_id* = *STA* **entonces**
 - 2: *RREQ* descartado
 - 3: **otro, si** (*my_id* = *STA* **y** *prev_id* = *STA*) **ó** (*my_id* = *STA* **y** *prev_id* = *MP*)
 ó (*my_id* = *STA* **y** *prev_id* = *MPP*) **entonces**
 - 4: *RREQ* descartado
 - 5: **otro, si** *my_id* = *MPP* **y** *prev_id* = *STA* **entonces**
 - 6: *RREQ* descartado
 - 7: **otro, si** *my_id* = *STA* **y** *prev_id* = *MAP* **y** *dest_id* ≠ *my_id* **entonces**
 - 8: *RREQ* descartado
 - 9: **otro**
 - 10: *RREQ* aceptado
 - 11: **fin si**
-

7.3. Resultados de la simulación

En esta sección mostramos los resultados obtenidos a través del análisis estadístico de las trazas de simulación. Cada uno de los resultados que se presenta corresponde a valores promedio de un conjunto de 40 simulaciones por experimento.

7.3.1. ‘Throughput’ y tasa de entrega promedio

En la Figura 7.4a se muestra el *throughput* promedio que se alcanza en la red con el uso del protocolo de encaminamiento AODV modificado. Se puede apreciar que la tendencia es creciente para este parámetro y alcanza como límite superior los 215 kbps promedio. A medida que la tasa de transmisión promedio de los usuarios aumenta, la variación del *throughput* también lo hace. Además es posible apreciar que el sistema tiene un comportamiento similar para este parámetro cuando el número de usuarios es superior a 30. En la Figura 7.4b se muestra el porcentaje promedio de paquetes entregados hasta su destino. La degradación de este parámetro se ve influenciada tanto por el aumento creciente del número de usuarios en la red así como por incremento de su tasa de transmisión promedio. Esta medida de desempeño muestra que el sistema degrada rápidamente sus prestaciones, y solo el 17.5 % de los resultados obtenidos ofrecen una tasa de entrega mayor al 50 %. Estos resultados solo son obtenidos con muy baja carga de tráfico en la red, es decir con un número de usuarios menor a 50 y con tasas de transmisión promedio por debajo de los 100 kbps.

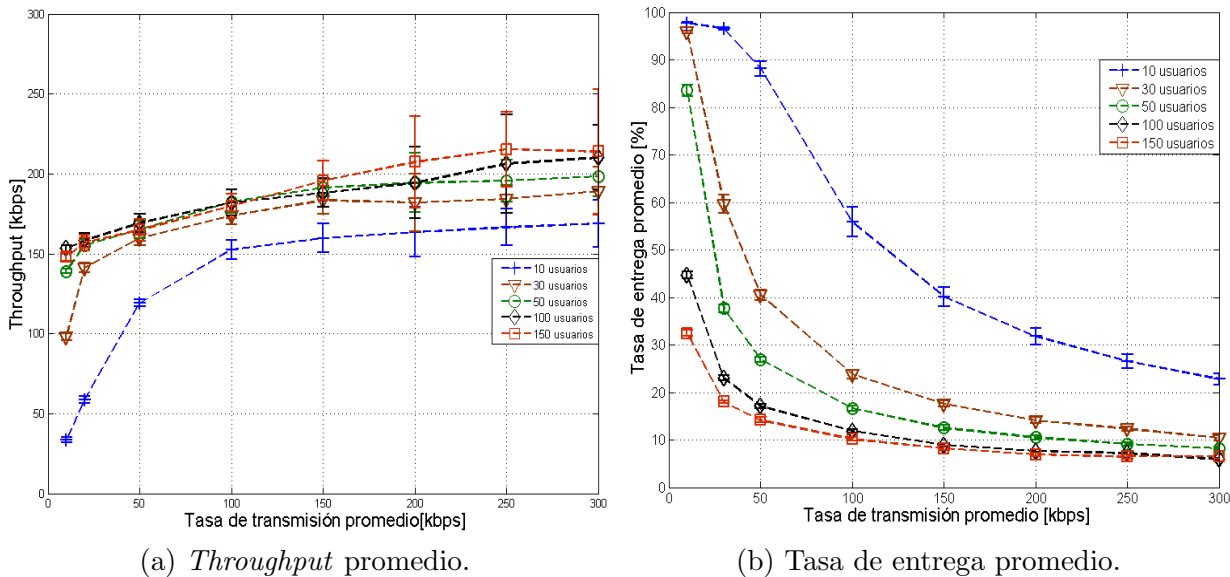


Figura 7.4: ‘Throughput’ y tasa de entrega promedio inducidos por AODV.

7.3.2. Retardo promedio y carga de señalización del protocolo

En la Figura 7.5a se muestra el retardo promedio que presentan los paquetes que han sido entregados exitosamente dentro de la red. Se puede apreciar que en el 85 % de los experimentos de simulación, el retardo promedio es mayor a 2 segundos y alcanza un nivel máximo cercano a los 10 segundos, específicamente para 100 y 150 usuarios. La tasa de crecimiento del retardo es susceptible al aumento gradual de la tasa de transmisión. Sin embargo, cuando la tasa de transmisión promedio sobrepasa los 100 kbps el sistema presenta una región de estabilidad. En esta región, la tasa de crecimiento del retardo promedio decrementa a niveles muy por debajo de los que se obtiene a bajas tasas de transmisión, y esto se debe al estado estable que alcanza el sistema, el cual se puede apreciar conjuntamente en las Figuras 7.5a, 7.4a y 7.7. La Figura 7.5b muestra el porcentaje de paquetes de señalización utilizados por el protocolo de encaminamiento. En esta figura se representa la fracción del número total de paquetes en el sistema que corresponde a paquetes de señalización del protocolo. A medida que el tráfico de la red se incrementa, el porcentaje de paquetes de señalización disminuye y alcanza, en el mejor de los casos, niveles por debajo del 25 %. Sin embargo, el peor de los escenarios es ocasionado por un número elevado de usuarios, entre 100-150, utilizando bajas tasas de transmisión, el porcentaje de paquetes de control, obtenido bajo estas condiciones, llega a alcanzar valores por encima del 40 % del total de paquetes en la red.

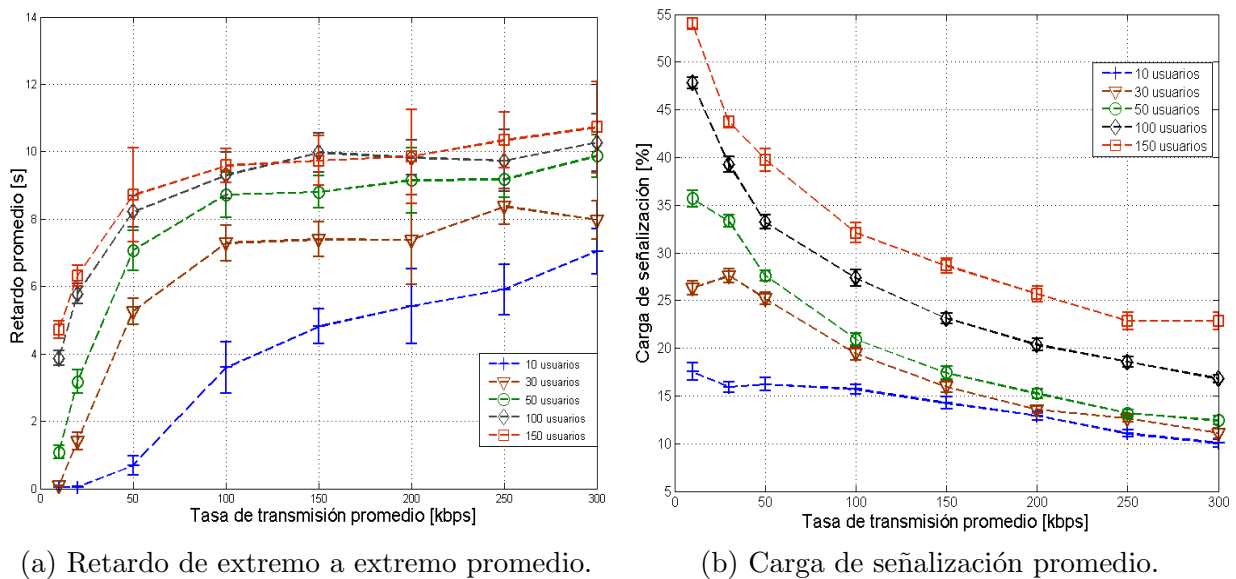
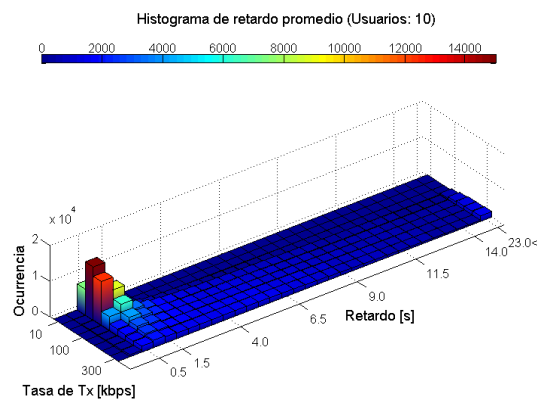


Figura 7.5: Retardo y carga de señalización promedio inducidos por AODV.

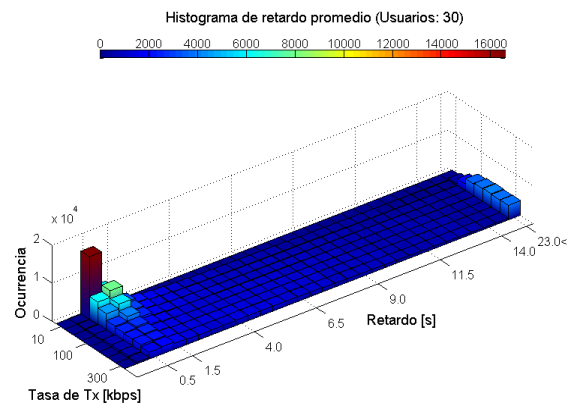
7.3.3. Distribución del retardo

Uno de los parámetros de evaluación que presentan una alta variación en sus resultados, es el retardo. Una forma de mostrar claramente el comportamiento de este parámetro, es a

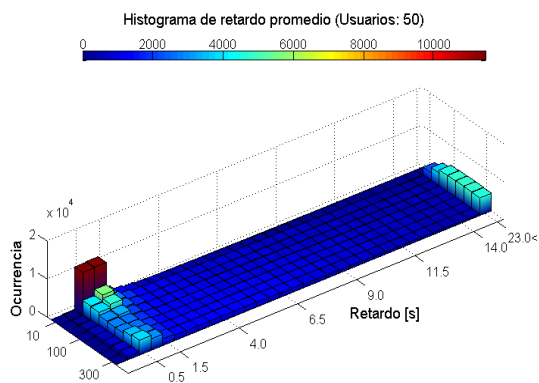
través de los histogramas mostrados en la Figura 7.6. A través de éstos, es posible notar que la variabilidad del retardo es el factor que impacta directamente en los promedios obtenidos, mostrados en la Figura 7.5a. Se puede apreciar que una gran concentración de paquetes tiene retardos menores a 1.5s. A medida que la tasa de transmisión y el número de usuarios se incrementa, el número de paquetes, cuyos retardos se encuentran por encima de los 23s, aumenta considerablemente e influye en los promedios obtenidos previamente.



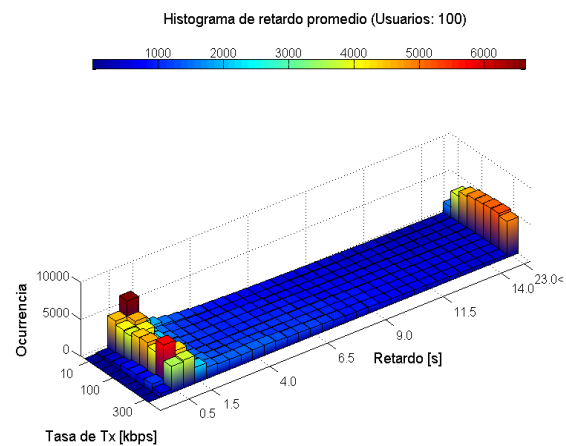
(a) Usuarios: 10



(b) Usuarios: 30



(c) Usuarios: 50



(d) Usuarios: 100

Figura 7.6: Histogramas del retardo promedio de extremo a extremo.

7.3.4. Latencia de descubrimiento de trayectoria

Uno de los parámetros de evaluación más importante para los protocolos de encaminamiento reactivos es la latencia de adquisición de la ruta de comunicaciones. Este parámetro indica el tiempo promedio que le toma al protocolo de encaminamiento para descubrir una ruta que permita comunicar un par de nodos. En la Figura 7.7 se muestra la latencia promedio que se obtiene al utilizar la versión modificada de AODV. Las curvas que se muestran en la figura, demuestran la tendencia creciente de este parámetro como una función del número de usuarios y sus respectivas tasas de transmisión promedio. A pesar de su propiedad reactiva y del tamaño creciente de la red, el protocolo ofrece una latencia menor a 2.5s lo cual no representa, al menos en esta evaluación, una desventaja considerable respecto a su contraparte proactiva.

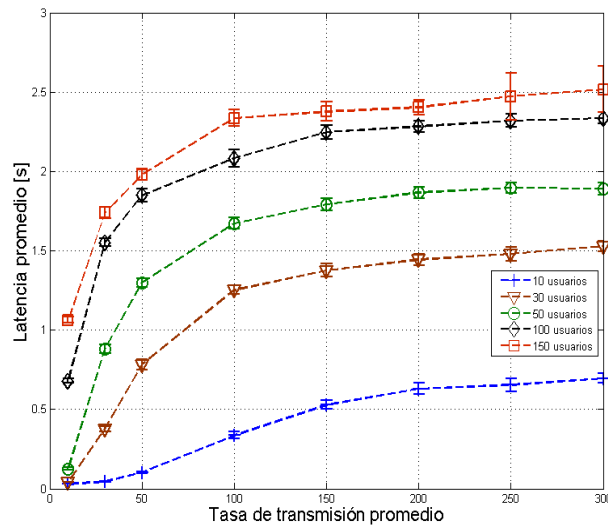


Figura 7.7: AODV Latencia promedio.

7.3.5. Distribución del tráfico y de las pérdidas en la malla

Una forma de evaluar el desempeño del protocolo de encaminamiento dentro de la arquitectura jerárquica de iWMN, es mostrando la forma en la que éste distribuye el tráfico dentro del *backbone* de la red. En la Figura 7.8 se muestran los ejemplos más representativos de los resultados de nuestra evaluación respecto a este renglón. Cuando la red presenta una baja carga de tráfico, el protocolo de encaminamiento concentra gran parte tráfico en la región más cercana al MPP, ubicado en la coordenada (1,1), véase la Figura 7.8a. Cuando la carga en la red es intermedia, el tráfico, si bien es concentrado en la región cercana al MPP, ahora es distribuido en regiones más alejadas del portal, véase Figura 7.8b. A medida que la carga de tráfico aumenta, hasta alcanzar un nivel considerablemente elevado, se puede apreciar que éste es distribuido a lo largo del *backbone* de la red, y principalmente concentrado en los puntos de acceso de la malla, este comportamiento se puede apreciar en la Figura 7.8c.

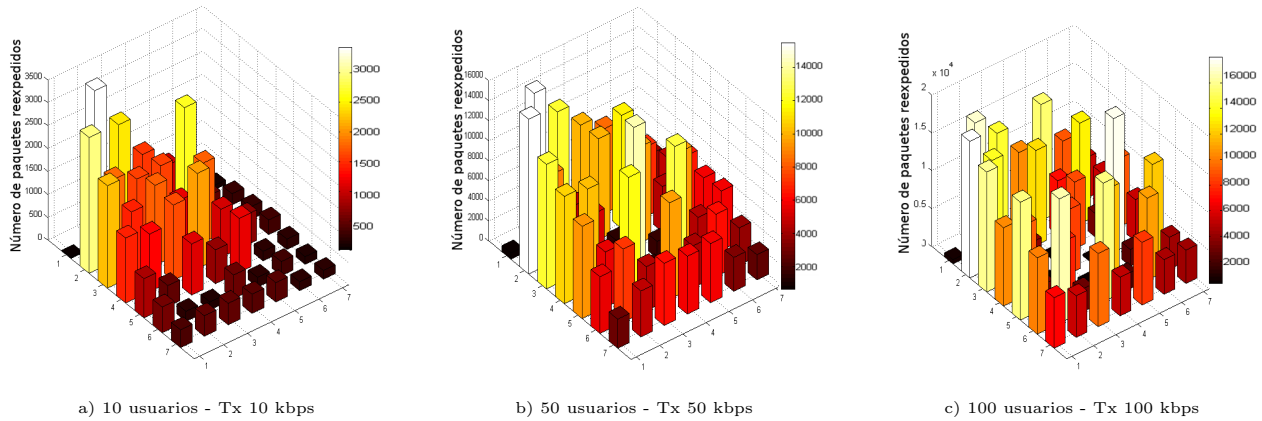


Figura 7.8: AODV Distribución del tráfico dentro del *backbone* de la red.

Del mismo modo en el que hemos mostrado la distribución del tráfico en el *backbone* de la red podemos presentar la forma en la que son distribuidas las pérdidas de paquetes de datos. Si bien una pequeña porción de las pérdidas se presenta en las filas de espera de los usuarios móviles, la mayoría de éstas ocurre en el *backbone* de la red. En la Figura 7.9 mostramos algunos ejemplos representativos de nuestra evaluación. Cuando la carga en la red es baja, las pérdidas son menores y éstas se concentran principalmente en la zona central del *backbone* de la red, lo cual se puede apreciar en la Figura 7.9a. A medida que el tráfico de la red incrementa, las pérdidas aumentan y se continúan concentrando en la zona central del *backbone*. De manera muy singular se puede apreciar que cuando la carga de la red se eleva, parte de las pérdidas se sesga hacia una región alejada del portal de la red.

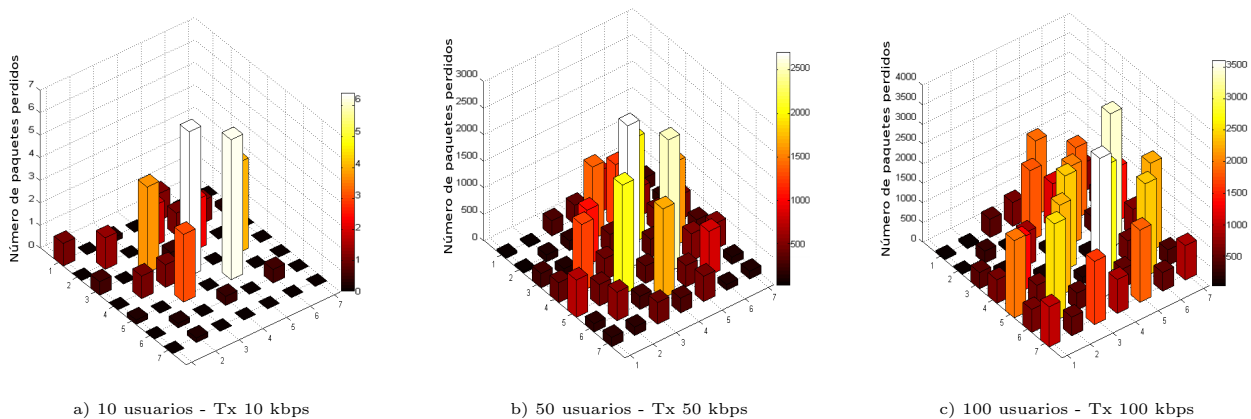


Figura 7.9: AODV Distribución de las pérdidas dentro del *backbone* de la red.

Capítulo 8

Evaluación del protocolo DSDV

8.1. Introducción

Destination Sequenced Distance Vector (DSDV) ha sido uno de los protocolos proactivos más populares para redes *ad hoc*. Esta propuesta de encaminamiento fue presentada por Perkins y Bhagwat en 1994 [57] y su funcionamiento se basa en el algoritmo vector-distancia de Bellman-Ford (BF). A pesar de la simplicidad y eficiencia de este algoritmo, es bien sabido que éste puede ocasionar la creación de bucles [58]. Una de las primeras causas que propician este problema es que los nodos seleccionan, basados en información que se obtiene de manera distribuida, al nodo inmediato que permite enviar un paquete de datos hasta un nodo destino; sin embargo, esta decisión puede estar basada en información antigua y muy probablemente incorrecta. Cuando esto sucede, un paquete puede ser enviado por un bucle y continuar transitando en el mismo aún cuando el nodo destino a donde va dirigido es inalcanzable en la red y su ausencia no fue detectada a tiempo. En una red *ad hoc*, la movilidad, y en consecuencia los cambios de la topología, requieren que cada nodo sea capaz de detectar oportunamente la ausencia de un nodo con el fin de evitar el envío de información a través de bucles en las trayectorias.

Para atender este problema, DSDV utiliza números de secuencia y al mismo tiempo mantiene la simplicidad del algoritmo de BF. Dado que este protocolo es de carácter proactivo, el intercambio de información de encaminamiento y el cálculo de rutas de comunicación se realiza de manera periódica, de este modo, cada nodo obtiene y procesa información actualizada y confiable de la organización de la red. El funcionamiento distribuido de este protocolo demanda que cada uno de los nodos que componen la red comparta su tabla de encaminamiento con sus nodos vecinos. Solo de este modo, cada nodo podrá calcular, para cada destino dentro de la red, al nodo vecino que proporcione la mejor ruta de comunicaciones. Los rasgos más importantes de este protocolo de encaminamiento, así como los resultados de la evaluación del mismo en iWMN, se presentan en la parte complementaria de este capítulo.

8.2. Procedimiento de descubrimiento de ruta

Cada que un nodo desea transmitir información es necesario que conozca un camino óptimo para hacerla llegar hasta su destino. El procedimiento de descubrimiento de ruta utiliza información, principalmente sobre la forma en la que se organiza la red, para determinar el camino óptimo que permite enviar información desde un nodo fuente hasta un nodo destino. DSDV es un protocolo que utiliza tablas de encaminamiento para almacenar y compartir las rutas óptimas de comunicación. Cada uno de los nodos que compone la red, administra su propia tabla de encaminamiento y en ésta se almacenan todos los posibles destinos de la red, el costo del camino para llegar a cada uno de ellos así como el nodo inmediato que le permite comunicarse con cada nodo destino de manera óptima. Para poder construir esta tabla de encaminamiento tan detallada es necesario conocer la topología de la red, y una forma de hacerlo es a través de la cooperación de los elementos que la componen. El protocolo DSDV exige que cada nodo comparta su visión de la red con sus nodos vecinos y al mismo tiempo la reciba de éstos. Cuando este procedimiento se realiza en repetidas ocasiones, cada nodo puede obtener una visión global de la red. Con esta información, cada nodo puede determinar cual es el nodo vecino que ofrece el mejor camino de comunicación hacia un nodo destino; este resultado es almacenado en la tabla de encaminamiento y compartido de nueva cuenta con los nodos vecinos. Cada uno de los elementos que se almacena en esta tabla de encaminamiento es etiquetado con un número de secuencia. Este número de secuencia es un contador, administrado por cada nodo destino, el cual es adjuntado e incrementado por cada paquete de señalización enviado por este nodo. Este identificador permite discernir la información actualizada de aquella que no lo es.

Para mantener actualizada la información sobre la topología de la red en cada nodo, DSDV requiere que cada uno de ellos comparta periódicamente los datos que residen en su tabla de encaminamiento. Para que este procedimiento sea significativo, la frecuencia con la que se comparte esta información debe ser lo suficiente como para detectar los cambios que suceden en la red. En la Figura 8.1 se ejemplifica la carga de señalización necesaria para la utilización de DSDV en una red compuesta por 9 nodos. Cada mensaje de señalización, en su forma más elemental, está integrado por:

- Su número de secuencia actualizado, correspondiente al nodo que envía el paquete de señalización.
- El identificador del nodo destino.
- El número de saltos necesarios para llegar al nodo destino.
- El número de secuencia actualizado y correspondiente al nodo destino.

Cada que un nodo recibe información de la tabla de encaminamiento de sus nodos vecinos, almacena o actualiza la ruta de comunicaciones tomando como base las siguientes condiciones:

- Cualquier ruta con un número de secuencia más reciente comparado con el de la misma ruta almacenada, será seleccionada.
-

- Si una ruta tiene el mismo número de secuencia pero menor costo de encaminamiento, entonces esta dicha ruta se escoge.

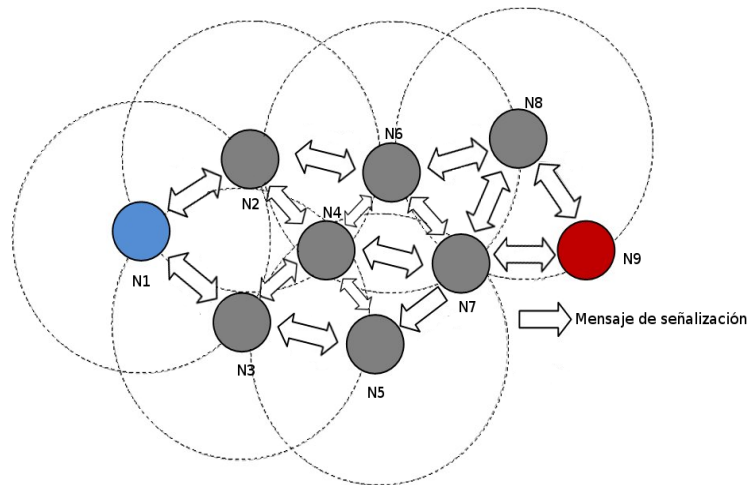


Figura 8.1: Señalización del protocolo DSDV.

Haciendo referencia a la Figura 8.3, cuando el nodo X recibe información proveniente de Y sobre la ruta para comunicarse con Z , y asumiendo que el último número de secuencia de Z visto por X es X_z y el último visto por Y es Y_z , el proceso de actualización de la ruta deberá satisfacer las siguientes condiciones:

- Si $X_z > Y_z$, se ignora la información de encaminamiento recibida de Y .
- Si $X_z = Y_z$, se toma en consideración el costo de la ruta. Aquella cuyo costo sea el menor será almacenada en la tabla de encaminamiento.
- Si $X_z < Y_z$, X selecciona a Y como el siguiente salto para alcanzar a Z y se asigna a X_z el valor de Y_z .

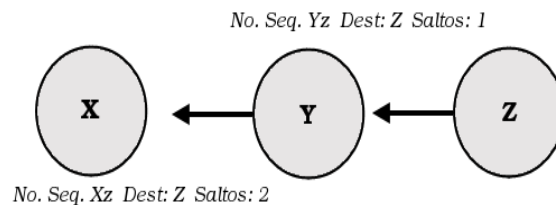


Figura 8.2: Envío de un paquete de señalización DSDV del nodo Y al nodo X.

Cuando un enlace de comunicaciones se pierde, ocasionado principalmente por la movilidad de los nodos, la distancia hacia este nodo se define como infinita. Y si este nodo es un nodo

vecino que sirve como salto inmediato para llegar a otros nodos, la distancia hacia estos nodos también se considera infinita. Este evento se envía inmediatamente para que se propague en la red y alerte a los otros nodos. La movilidad, es un evento que puede provocar la pérdida de enlaces de comunicación, y en un entorno altamente dinámico sus efectos serían desastrosos, pues la cantidad de mensajes de señalización, necesarios para dar aviso de estos eventos, se incrementaría al grado de consumir gran parte de los recursos de la red. La solución para este tipo de eventos consiste en utilizar dos tipos de mensajes de control: el primero (*full dump*), contiene toda la información de la tabla de encaminamiento y el segundo (*Incremental Dump*) solo contiene los cambios menores que ha sufrido la tabla de encaminamiento desde el último *full dump* enviado.

Para clarificar el proceso de actualización de las tablas de encaminamiento mostramos, en la Figura 8.3, un ejemplo representativo de este proceso. En la Figura 8.3a se muestra el estado de las tablas de encaminamiento de los nodos *A*, *B* y *C*, previa actualización. En este ejemplo, el nodo *B* incrementa su número de secuencia y envía su tabla de encaminamiento hacia sus nodos vecinos dado que ha detectado un cambio en el costo de un enlace. Al momento en que los nodos *A* y *C* reciben este paquete, comprueban que el número de secuencia del mensaje recibido es más reciente que el número de secuencia respectivo en su tabla de encaminamiento, es decir, el número de secuencia de *B*; en este momento los nodos *A* y *C* actualizan su tabla de encaminamiento y almacenan el nuevo número de secuencia correspondiente al nodo que envió el paquete, tal y como se muestra en la Figura 8.3b.

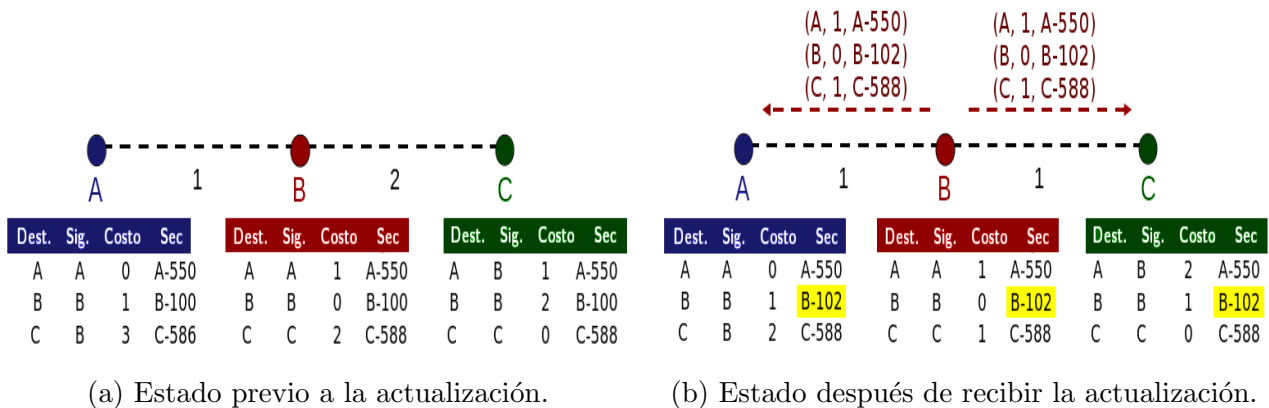


Figura 8.3: Estado de las tablas de encaminamiento durante el proceso de actualización.

Cuando un nuevo nodo se integra a la red, éste difunde su tabla de encaminamiento a sus nodos vecinos, tal y como se muestra en la Figura 8.4a. En este ejemplo, el nodo *D* ingresa a la red y difunde su tabla de encaminamiento al nodo *C*. El nodo *C* al momento de recibir esta información, incluye al nodo *D* en su tabla de encaminamiento y difunde a su nodo vecino *B* esta nueva información, no sin antes incrementar su número de secuencia, tal y como se muestra en la Figura 8.4b. El mismo proceso lo realiza el nodo *B* y envía la información al nodo *A*, de modo que todos los nodos en la red detectan la presencia del nodo *D*.

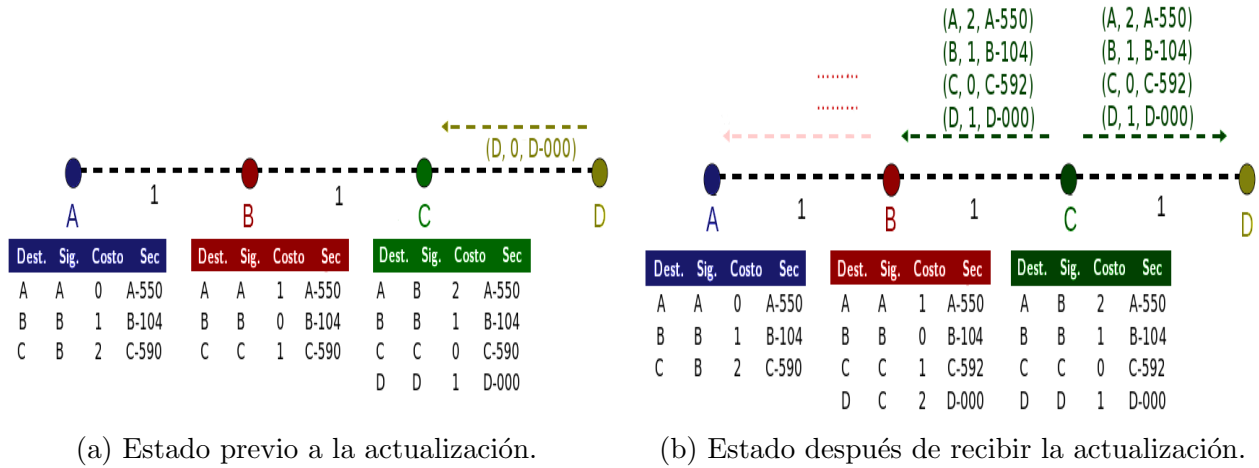


Figura 8.4: Estado de las tablas de encaminamiento durante la integración de un nuevo nodo.

Finalmente, en la Figura 8.5 se muestra la forma en la que DSDV atiende la pérdida de conectividad en la red. En la Figura 8.5a se muestra como el nodo *D* pierde conectividad con su nodo vecino *C*. Al momento en el que el nodo *C* detecta que no existe el enlace de comunicación con el nodo *D*, en su tabla de encaminamiento se asigna el costo ∞ a esta trayectoria y de inmediato se envía la notificación a sus nodos vecinos, como se muestra en la Figura 8.5b. Aún cuando el nodo *C* reciba notificaciones de la ruta hacia *D*, éste las ignora debido a que cuenta con un número de secuencia actualizado para esta trayectoria. Los nodos *A* y *B*, al momento de recibir la notificación de la ausencia del nodo *D* inmediatamente le asignan el costo ∞ a la ruta, lo cual indica que dicho nodo es inalcanzable en la red.

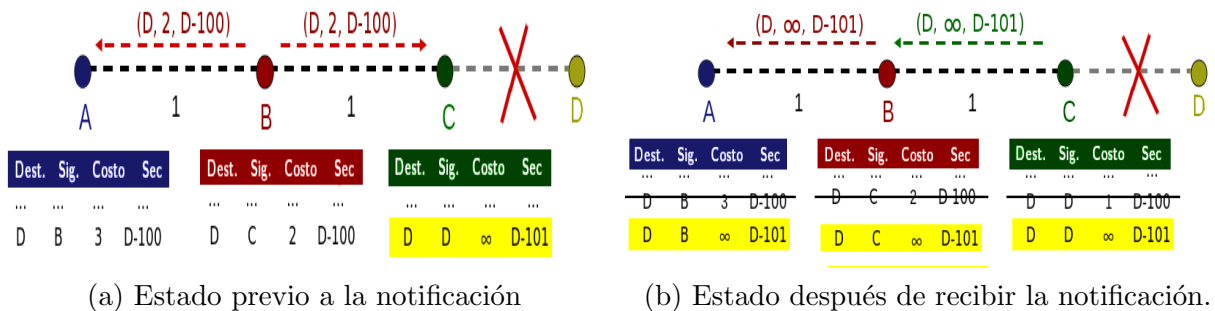


Figura 8.5: Estado de las tablas de encaminamiento durante la pérdida de un nodo.

8.3. Propuesta de mejora al protocolo de encaminamiento DSDV

Como se ha mostrado en la Sección 7.2, las iWMN cuentan con una organización jerárquica que tiene reglas definidas para las interacciones de los nodos que componen la red. Sin embargo, DSDV ha sido diseñado para funcionar de manera distribuida en una red carente de jerarquía, es decir, una red en la que todos los nodos que la componen desempeñan las mismas tareas. Por esta razón es necesario modificar el diseño clásico de este protocolo, para que su funcionamiento se ajuste a las reglas definidas para iWMN. La idea principal de esta mejora es limitar el mecanismo de descubrimiento de rutas para construir rutas válidas para iWMN. Basados en el mecanismo de descubrimiento de ruta, que se ha detallado en la Sección 8.2, proponemos modificar esta etapa, de forma tal que solo a través de los puntos de acceso (*MAPs*) sea posible establecer comunicación entre los clientes de la red y el *backbone* de la misma. La modificación propuesta requiere que cada nodo de la red sea capaz de ubicar su posición en la jerarquía de la red y con base a esta información, cada nodo podrá determinar como procesar cada uno de los mensajes de señalización que reciba. Primeramente proponemos utilizar un identificador que distinga a cada nodo dentro de la red (*my_id*), conjuntamente con los datos almacenados dentro de cada paquete de señalización (*prev_id*), con estos datos podemos manipular la forma en la que serán construidas las rutas de encaminamiento, respetando la esencia del protocolo DSDV (BF, números de secuencia, etc). El Algoritmo 2 describe el procedimiento que ha sido implementado en la función de descubrimiento de trayectorias del protocolo DSDV. Esta propuesta genera un esquema de asociación proactivo para cada usuario dentro de la red. Cada *STA* en la red se mantendrá “asociada” al *MAP* del cual reciba mensajes de señalización mientras que en el *backbone* de la red se conservará el comportamiento clásico del protocolo DSDV.

Algoritmo 2 . Procedimiento de actualización de la tabla de encaminamiento.

Entrada: Paquete de señalización recibido, Identificadores del paquete *my_id* y *prev_id*

- 1: **si** *my_id* == *STA* **entonces**
 - 2: **si** *prev_id* == *MAP* **entonces**
 - 3: Actualizar la tabla de encaminamiento
 - 4: Comprobar que todas las rutas construidas esten asociadas al *prev_id*
 - 5: **otro**
 - 6: Descartar paquete de actualización
 - 7: **fin si**
 - 8: **otro, si** (*my_id* == *MP* ó *my_id* == *MPP*) **y** *prev_id* == *STA* **entonces**
 - 9: Descartar paquete de actualización
 - 10: **otro**
 - 11: Actualizar la tabla de encaminamiento
 - 12: **fin si**
-

8.4. Resultados de la simulación

En esta sección se muestran los resultados obtenidos tras simular el protocolo modificado DSDV. Cada uno de los valores que se muestran en las gráficas de resultados, son promedios estadísticos obtenidos de un conjunto de 40 simulaciones por experimento. El conjunto de resultados que se muestran en esta sección representan, de manera detallada, los efectos que ocasiona este protocolo de encaminamiento en el escenario de simulación propuesto.

8.4.1. ‘Throughput’ y tasa de entrega promedio

En la Figura 8.6a se muestra la tendencia del *throughput* en la red. DSDV impulsa un comportamiento creciente para este parámetro y éste alcanza un nivel máximo aproximado a los 215 kbps. Los efectos del aumento gradual de la tasa de transmisión y del número de usuarios en la red son notorios. A medida que se incrementa la tasa de transmisión, el *throughput* también lo hace de manera gradual. El 45 % de los resultados obtenidos para este parámetro se encuentran entre los 150 y los 200 kbps, y solo el 22.5 % supera los 200 kbps, esto indica que la red alcanza un nivel de saturación que induce este comportamiento. Para un número de usuarios mayor a 30 y con tasas de transmisión promedio mayores a 30 kbps, el *throughput* presenta una tendencia muy similar para todos los casos analizados, éste crece gradualmente desde los 140 kbps hasta 200 kbps promedio. Como era de esperarse,

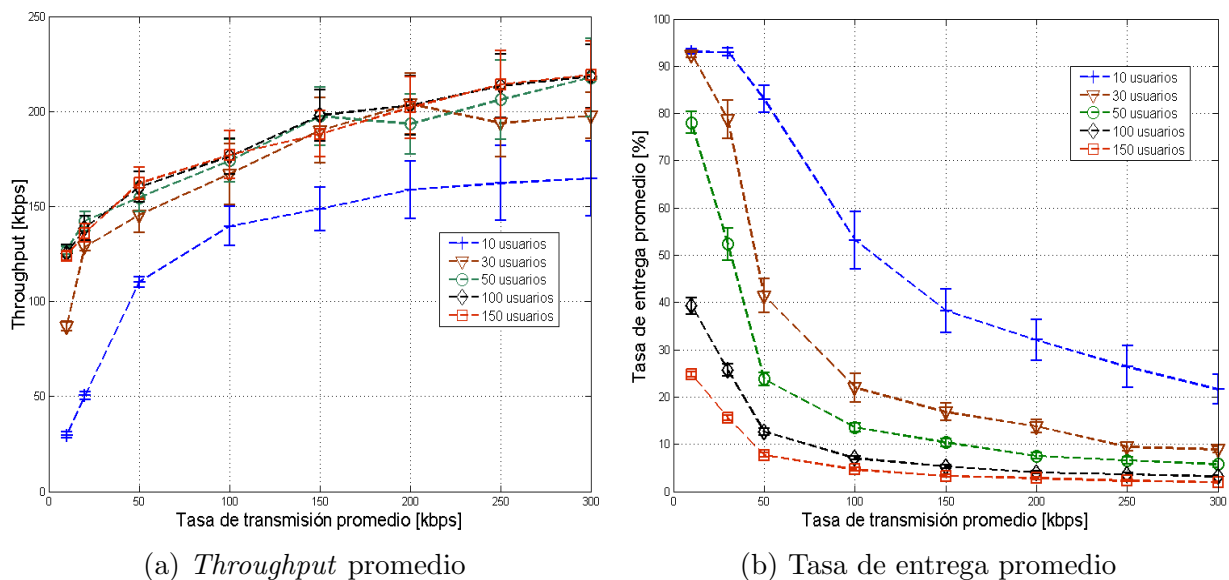


Figura 8.6: ‘Throughput’ y tasa de entrega promedio inducidos por DSDV.

En la Figura 8.6b mostramos el porcentaje de paquetes entregados hasta su destino. Se puede observar que el incremento gradual de la tasa de transmisión, así como del número de usuarios, degrada las prestaciones de la red. Solo el 20 % de los resultados obtenidos presentan

una tasa de entrega superior al 50 % del total de paquetes enviados. Cuando el número de usuarios se incrementa, la tasa de entrega disminuye hasta alcanzar un desempeño menor al 30 %, y este comportamiento se presenta en el 70 % de los experimentos realizados.

8.4.2. Retardo promedio y carga de señalización del protocolo

Cada paquete que se entrega hasta su destino requiere de un tiempo de traslado que va desde el momento en el que es enviado por el nodo fuente hasta el momento en el que es recibido por el nodo destino, este tiempo se define como el retardo de extremo a extremo. En la Figura 8.7a mostramos el retardo promedio que se presenta en la red tras utilizar el protocolo de encaminamiento DSDV. En la gráfica se muestra que el retardo sufre un incremento considerable respecto al que se obtiene al utilizar AODV. Aún cuando el número de usuarios sea el menor de nuestros valores propuestos (10), el retardo obtenido supera rápidamente los 5 segundos. Solo el 15 % de nuestros resultados ofrecen un retardo menor a 2.5 segundos, y estos resultados solo se han obtenido a muy bajas tasas de transmisión y con un número reducido de usuarios. La tendencia creciente de este parámetro depende principalmente de la carga de tráfico en la red. Las filas de espera en cada nodo de la malla incrementan su tamaño a medida que el tráfico de la red se incrementa, y por ende aumenta el tiempo promedio que cada paquete debe esperar en una fila de espera.

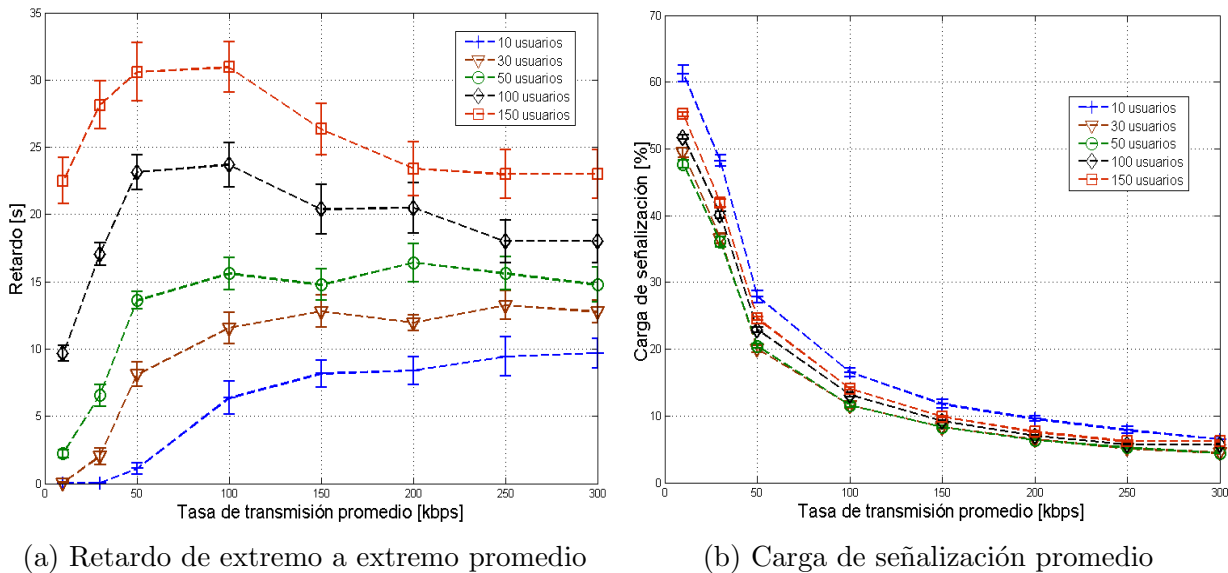


Figura 8.7: Retardo y carga de señalización promedio para DSDV.

En la Figura 8.7b se muestra el porcentaje de paquetes de señalización que utiliza el protocolo DSDV respecto a la totalidad de paquetes en la red. En esta gráfica podemos apreciar que este factor depende primordialmente de la tasa de transmisión promedio de las STAs de la red. A medida que ésta se incrementa gradualmente, el porcentaje de paquetes

de señalización se reduce de niveles que van desde el 60% a niveles por debajo del 10%. La gráfica muestra que la variación del número de STAs de la red tiene una mínima influencia en el comportamiento de este parámetro, pues la misma tendencia está presente para todos los casos analizados.

8.4.3. Distribución del retardo

El retardo promedio que se ha obtenido en esta evaluación presenta una tendencia creciente y una alta variación. En la Figura 8.8 mostramos los histogramas del retardo de extremo a extremo en la red para comprender de mejor forma la tendencia de este parámetro.

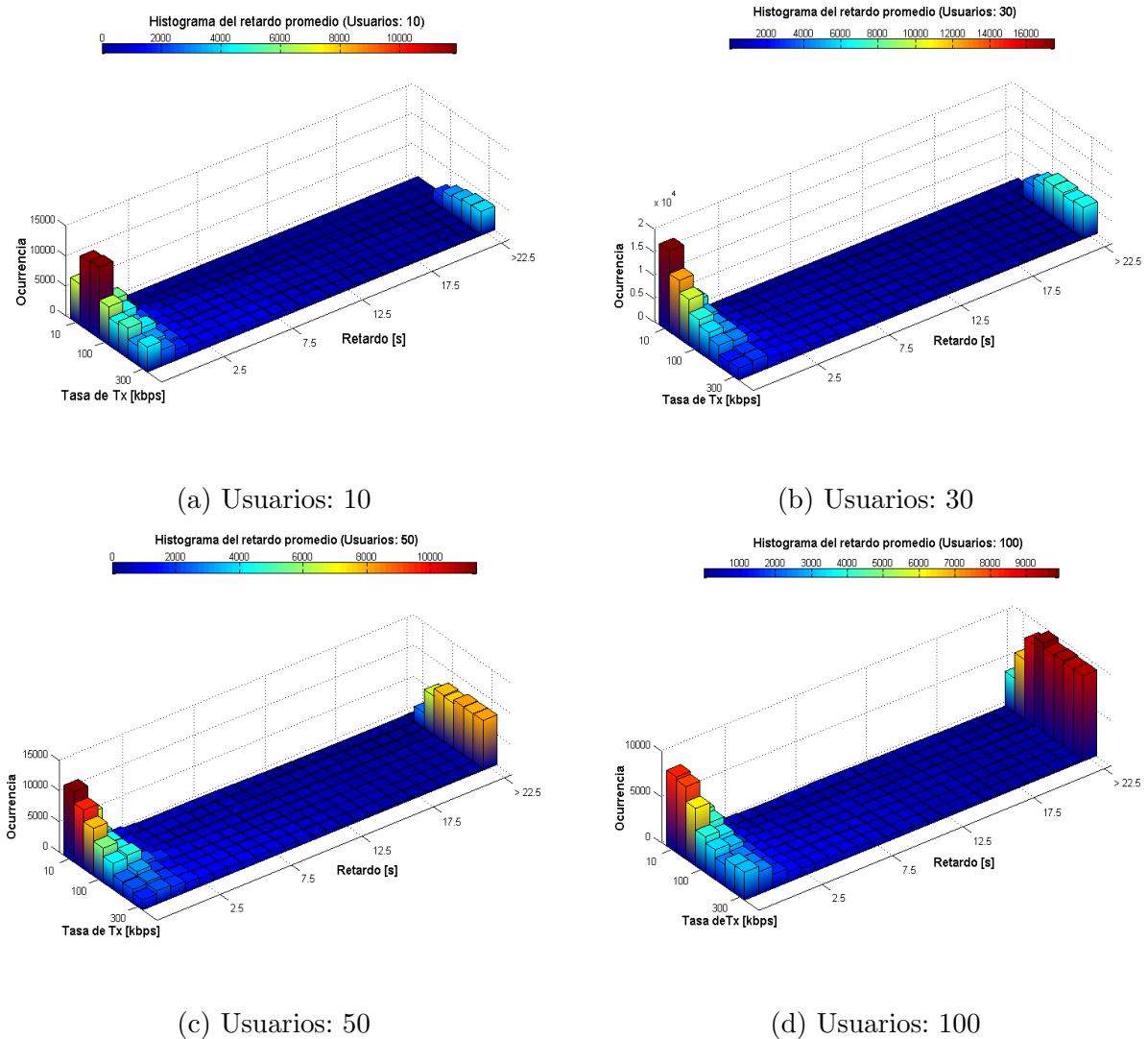


Figura 8.8: Histogramas del retardo promedio de extremo a extremo.

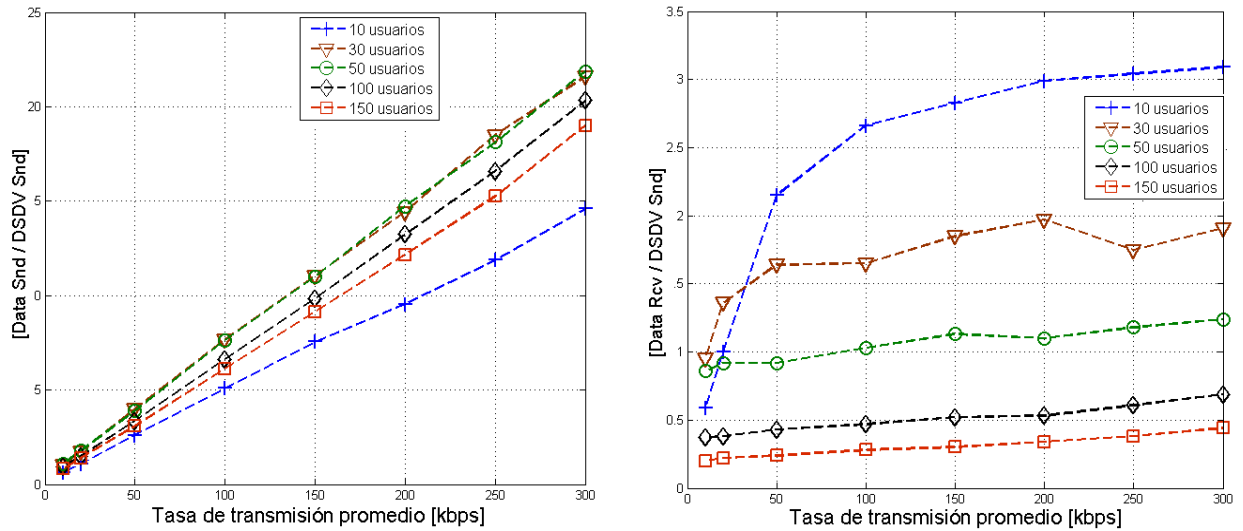
Por medio de estas gráficas es posible notar que existe un comportamiento singular. En todos los casos analizados se aprecia una gran concentración de paquetes cuyo retardo es menor a 2.5 segundos para bajas tasas de transmisión. A medida que la tasa de transmisión aumenta, el número de paquetes cuyo retardo es menor a 2.5 s disminuye y de manera muy particular, el número de paquetes cuyo retardo supera los 22.5 s se incrementa considerablemente. Esto influye directamente en los promedios calculados y presentados en la Figura 8.7a.

8.4.4. Señalización del protocolo

La carga de señalización que se ha mostrado en la Figura 8.7b representa el fracción del número total de paquetes que corresponde a mensajes de señalización. Para complementar este resultado, en la Figura 8.9a se muestra la relación entre el número de paquetes promedio que un nodo puede enviar en la red por cada paquete de señalización. Se puede apreciar que a medida que la tasa de transmisión promedio se incrementa, el número de paquetes que pueden ser enviados a la red, y cuyo costo representa un paquete de señalización, se incrementa gradualmente. En el mejor de los casos, el protocolo DSDV permite enviar hasta 20 paquetes de datos por cada paquete de señalización en la red. Sin embargo, a pesar del bajo costo que representa la señalización, en la Figura 8.9a se muestra la forma en la que decrementa la relación de paquetes entregados a su destino por mensaje de señalización. Cuando el número de usuarios es inferior a 50, el número de paquetes que llegan a su destino sobrepasan una relación de uno a uno con los mensajes de señalización. En el mejor de los escenarios, se entregan a su destino tres paquetes de datos por cada paquete de señalización en la red. Esta razón decrementa a medida que el número de STAs aumenta, hasta alcanzar una razón de 0.5 paquetes de datos entregados por mensaje de señalización.

8.4.5. Distribución del tráfico y de las pérdidas en la malla

Una de las formas en la que podemos evaluar el protocolo del encaminamiento en una iWMN, es a través del comportamiento inducido sobre el *backbone* de la misma. La forma en la que se distribuye el tráfico en el *backbone*, así como la distribución de las pérdidas son descriptores estadísticos de la forma en la que opera el protocolo de encaminamiento. Estos datos nos muestran principalmente el efecto que se produce en la red tras utilizar un esquema de encaminamiento. En la Figura 8.10 se muestran tres ejemplos que describen la forma en la que el protocolo DSDV distribuye el tráfico en el *backbone* de la red, bajo condiciones de baja, media y alta densidad de tráfico. En la Figura 8.10a se muestra la distribución de una baja carga de tráfico en el backbone del escenario de simulación. Se puede apreciar que gran parte del tráfico ha sido encaminado por los nodos cercanos al MPP de la malla, ubicado en la coordenada (1,1). Este mismo comportamiento se reproduce con una carga media de tráfico, lo cual también se muestra en la Figura 8.10b. Ahora bien, cuando la carga de tráfico de la red se incrementa a niveles elevados, e.g. 100 STAs con una tasa de transmisión de 100 kbps, la distribución del tráfico se muestra en la Figura 8.10c. En este caso se nota una mayor



(a) Paquetes de datos enviados por señalización (b) Paquetes de datos recibidos por señalización

Figura 8.9: Paquetes de datos enviados y recibidos por mensaje de señalización.

cantidad de tráfico en la red, y se aprecia que la distribución del mismo se concentra en los MAPs de la red; particularmente en aquellos que residen en la zona central del *backbone*.

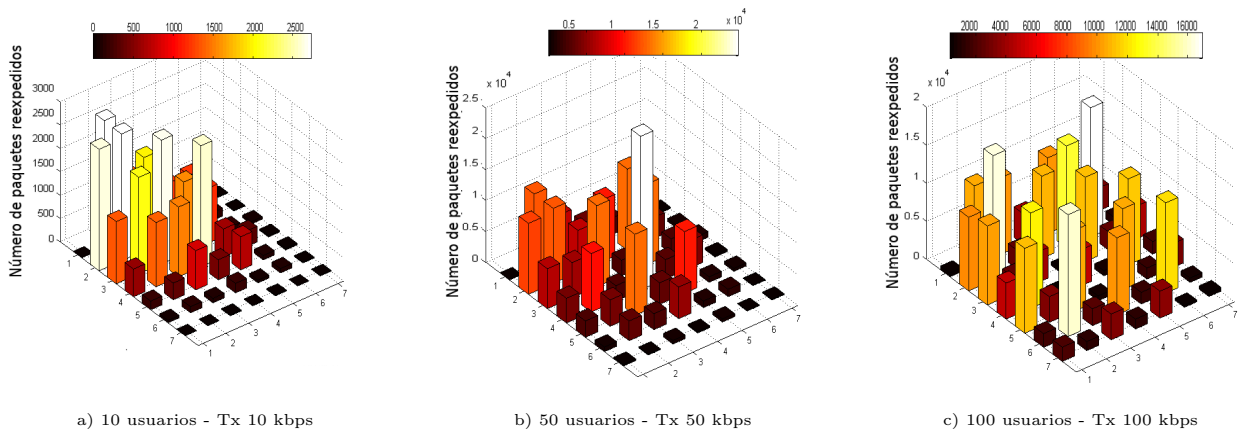


Figura 8.10: DSDV Distribución del tráfico dentro del *backbone* de la red.

En la Figura 8.11 se muestra la distribución de las pérdidas dentro del *backbone* de la red. Cuando la red se encuentra bajo una carga de tráfico baja y media, las pérdidas se concentran en la zona central de la malla. Se puede apreciar que a medida que el tráfico de la red se incrementa, las pérdidas se distribuyen a lo largo del escenario y se concentran principalmente en los MAPs de la malla.

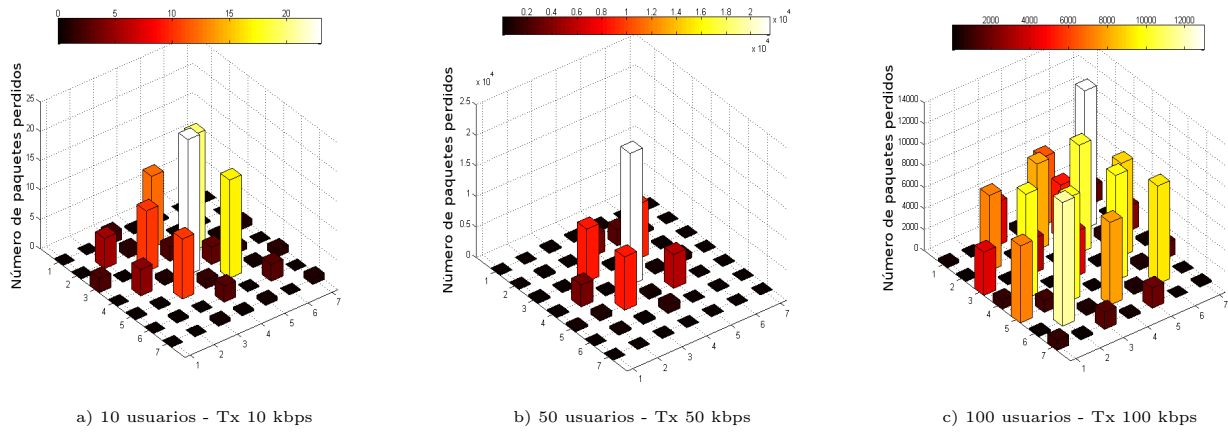


Figura 8.11: DSDV Distribución de las pérdidas dentro del *backbone* de la red.

Capítulo 9

Conclusiones y perspectivas para trabajo futuro

Las redes inalámbricas en malla en modo infraestructura (iWMNs) han surgido como una de las propuestas más viables para atender la demanda de conectividad total de una manera económica, eficiente y fácil de implementar. En este trabajo de investigación, hemos presentado un estudio detallado sobre las características y particularidades de esta novedosa arquitectura de red. Debido a que las iWMNs combinan algunas propiedades de la arquitectura de redes *ad hoc* y redes en modo infraestructura (WLAN), éstas heredan un conjunto de ventajas y dificultades de cada una de estas arquitecturas. Uno de los problemas más significativos en iWMNs es el *encaminamiento* de la información, y comúnmente, la solución más inmediata a este problema consiste en utilizar como base a los protocolos de encaminamiento diseñados específicamente para redes *ad hoc*. Por esta razón, en este trabajo hemos realizado un estudio detallado acerca del problema del encaminamiento en redes inalámbricas y hemos explorado el estado del arte de la evaluación de protocolos de encaminamiento en iWMNs. Los resultados obtenidos tras la revisión del estado del arte, justifican los objetivos planteados para este proyecto y de manera conjunta nos han permitido diseñar un escenario de simulación representativo y un conjunto integral de medidas de desempeño.

En este trabajo de tesis evaluamos el desempeño de dos protocolos de encaminamiento que son representativos de los esquemas de encaminamiento reactivo y proactivo para redes *ad hoc*. Se han seleccionado los protocolos de encaminamiento AODV y DSDV como los principales representantes del encaminamiento en redes *ad hoc*, debido a la gran popularidad de éstos. Estudiamos los efectos que cada esquema de encaminamiento induce en la red como función de la densidad de tráfico en la misma. Uno de los aportes más significativos de nuestra investigación, ha sido la propuesta de mejora al funcionamiento clásico de los protocolos de encaminamiento para generar un comportamiento basado en jerarquías tal y como lo demanda la arquitectura de las iWMNs; conservando en todo momento la ejecución distribuida de estos protocolos. Los resultados obtenidos muestran que cada uno de los protocolos ofrece ventajas bajo ciertas condiciones en la red. Ambos protocolos han ofrecido un desempeño similar para diversos parámetros, y las diferencias entre estos resultados han sido mínimas,

e.g. *throughput* y tasa de entrega. Sin embargo, existen parámetros en donde cada protocolo muestra ventajas muy superiores a las de su contraparte. Éstas se describen a continuación.

AODV ha presentado un mejor desempeño con niveles de carga baja-media. Este protocolo de encaminamiento ofrece un menor retardo comparado con el que se obtiene al utilizar DSDV. La tasa de entrega de AODV también es ligeramente superior a la que se obtiene con DSDV. Para niveles de carga baja, media y alta, AODV supera la tasa de entrega que ofrece DSDV en aproximadamente un 5% en todos los experimentos realizados. Por otro lado, AODV supera por un amplio margen los resultados de DSDV, en el mejor de los casos, AODV ofrece un retardo promedio 50% menor al que se obtiene con DSDV. DSDV por su parte, ha optimizado sustancialmente la carga de señalización, pues el porcentaje de paquetes de señalización se decrementa rápidamente a medida que la tasa de transmisión de las STAs se incrementa gradualmente. La tasa de decremento de este parámetro en DSDV, es mayor a la que se presenta con el protocolo AODV. DSDV logra disminuir su carga de señalización y permite enviar un mayor número de paquetes de datos en relación a lo que se obtiene con AODV. En el mejor de los casos, DSDV puede enviar hasta 20 paquetes de datos promedio por cada mensaje de señalización mientras que AODV logra enviar solo 10 paquetes de datos.

Por otro lado, AODV ha logrado distribuir de manera más uniforme el tráfico en la red, mientras que los resultados obtenidos para el protocolo DSDV demuestran que tanto las pérdidas así como la distribución del tráfico se ha concentrado muy específicamente en la zona central del *backbone* y principalmente en los MAPs. Una de las desventajas más importantes que enfrenta un protocolo de encaminamiento reactivo es el tiempo necesario para adquirir una ruta. En nuestro escenario de simulación, AODV requiere, para todos los casos, un tiempo de descubrimiento de rutas menor a 2.5 segundos, lo cual le representa una muy ligera desventaja respecto a DSDV cuyo tiempo promedio siempre resulto 0 segundos, pues el tiempo en el que comenzaron las transmisiones de datos fue superior a 20 segundos, lo cual le da el tiempo suficiente de convergencia al protocolo.

Dadas las ventajas que cada protocolo de encaminamiento presenta ante las diversas propiedades de la red, sugerimos como trabajo futuro, el diseño de un protocolo híbrido que tome como base los resultados que se han obtenido en esta investigación. Dada la naturaleza estática y estable del *backbone* de la red, DSDV puede ser el candidato óptimo para funcionar dentro de este nivel de la jerarquía de las iMWNs. La baja carga de señalización y su comportamiento proactivo se adapta de mejor modo a la conducta del *backbone*. Si consideramos que este nivel de la red cuenta con un alto grado de estabilidad, se podría disminuir la carga de señalización del protocolo DSDV, si la frecuencia con la que se intercambian los mensajes de señalización se ajusta dinámicamente a los eventos en el backbone. Es decir, si la topología y conectividad del *backbone* se mantienen estables, la frecuencia de señalización puede ser disminuida gradualmente, y solo en caso de detectarse algún evento ajeno al comportamiento del *backbone* se podría aumentar la frecuencia de estos mensajes hasta que la totalidad del sistema detecte el evento y se alcance de nueva cuenta un estado de estabilidad. La movilidad

y la constante pérdida de conectividad entre las STAs y el *backbone* de la red limitan el uso de DSDV en la parte inferior de la jerarquía, es decir, en los usuarios móviles. En este caso proponemos utilizar AODV para ser ejecutado por los usuarios móviles. Las frecuentes pérdidas de conectividad en la parte inferior de la jerarquía requieren de un protocolo reactivo que solo en el momento de transmitir información genere un mecanismo reactivo de asociación con el *backbone* de la red y AODV es una muy buena opción para este fin.

Como se ha mostrado en los resultados de esta investigación, los MAPs de la red son los elementos que sufren una mayor cantidad de pérdidas y presentan una alta densidad de tráfico. En el trabajo futuro es importante evaluar el efecto de la topología del *backbone* en el desempeño de la red. La creación de regiones de cobertura superpuestas o bien la inclusión de un mayor número de portales en la malla podrían incrementar significativamente las prestaciones de la red. La utilización conjunta de métricas de encaminamiento que contemplan otras propiedades de la red, podría incrementar el desempeño de los protocolos de encaminamiento.

Referencias

- [1] panOULU Open Wireless Internet Access, <http://www.panoulu.net>, Oulu, Finland, 2009.
- [2] 510pen - East Bay Community Mesh Network, <http://510pen.org/>, Oakland, E.U., 2011.
- [3] WirelessHART Mesh Networking, *Applying Wireless Technology in Real Time Industrial Process Control*, Austin TX, E.U., 2008.
- [4] ROMANSE - Traffic and Travel Information for Southampton, <http://southampton.romanse.org.uk>, Southampton, England, 2009.
- [5] V. Garg, *Wireless Communications and Networking*, Morgan Kaufman Publishers, 1ra ed. 2007.
- [6] S. Sesay, Z. Yang and J. He, *A Survey on Mobile Ad hoc Networks*, Information Technology Journal, Vol. 2, No. 3, pp. 168-175, 2004.
- [7] M. Conti, *Body, Personal, and local Ad hoc Wireless Networks*, in *The Handbook of Ad hoc Wireless Networks*, Ed. CRC Press, pp. 14-35, 2002.
- [8] A. Kumar, D. Manjunath and J. Kury, *The IEEE 802.11 WLAN Standards*, in *Wireless Networking*, Ed. Morgan Kaufmann, pp. 204-211, 2008.
- [9] R. Bruno, M. Conti and E. Gregori, *Mesh Networks: Commodity Multihop Ad hoc Networks*, IEEE Communications Magazine, Vol. 43, No. 3, pp. 123-131, March, 2005.
- [10] J. Camp and E. Knightly, *The IEEE 802.11s Extended Service Set Mesh Networking Standard*, IEEE Communications Magazine, Vol. 46, No. 8, pp. 120-126, August 2008.
- [11] F. Akyildiz and X. Wang and W. Wang, *Wireless Mesh Networks: A survey*, Computer Networks and ISDN Systems, Vol. 47, No. 4, pp. 445-487, March, 2005.
- [12] F. Akyildiz and X. Wang, *A Survey on Wireless Mesh Networks*, IEEE Communications Magazine, Vol. 43, No. 9, pp. 23-30, September, 2005.
- [13] F. Akyildiz and X. Wang, *Wireless Mesh Networks*, Advanced Texts in Communications and Networking, John Wiley and Sons, pp. 7-13, 2009.

-
- [14] X. Wang and A. Lim, *IEEE 802.11s wireless mesh networks: Framework and challenges*, Ad Hoc Networks Journal (Elsevier), Vol. 6, No. 6, pp. 970-984, August, 2008.
- [15] G. Hiertz, D. Denteneer, S. Max, R. Taori, J. Cardona and L. Berlemann, *IEEE 802.11s: The WLAN Mesh Standard*, IEEE Wireless Communication, Vol. 19, No. 1, pp. 104-111, February, 2010.
- [16] M.N. José and M.B. Josep, *A survey on routing Protocols that Really Exploit Wireless Mesh Networks Features*, IEEE Journal of Communications, Vol. 5, No. 3, pp. 211-231, March, 2010.
- [17] J. Wang, B. Xie and D.P. Agrawal, *Guide to Wireless Mesh Networks*, In Journey from Mobile Ad hoc Networks to Wireless Mesh Networks, Springer, 2009.
- [18] D. Medhi and K. Ramasamy, *Network Routing, Algorithms, Protocols and Architectures*, Morgan Kaufman Publishers, 2007.
- [19] D. Johnson, *Routing in Ad hoc Networks of Mobile Hosts*, Proceeding of the Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, IEEE Computer Society, pp. 158-163, 1994,
- [20] M. Steenstrup, *Routing in Communications Networks*, Prentice Hall, pp. 84-87 & 135-138, 1995.
- [21] G. Jayakumar and G. Ganapathy, *Performance Comparison of Mobile Ad-hoc Network Routing Protocol*, International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS), Vol. 7, No. 11, pp. 77-84, November, 2007.
- [22] N. Maghnathan, *Survey and Taxonomy of unicast Routing Protocols for Mobile Ad hoc Networks*, International Journal of Graph Theory in Wireless Ad hoc Networks and Sensor Networks, Vol. 1, No. 1, pp. 1-21, December, 2009.
- [23] M. E. Gil Jiménez, *Estudio de la eficiencia de encaminamiento del protocolo AODV en redes ad hoc inalámbricas de gran escala*, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación, 2009.
- [24] S. Mohseni, R. Hassan, A. Patel, and R. Razal, *Comparative Review Study of Reactive and Proactive Routing Protocols in MANETs*, 4th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (IEEE DEST 2010), pp. 304-309, October, 2010.
- [25] A. Hassen and M. Othman, *Review of Routing Protocols and its Metrics for Wireless Mesh Networks*, IEEE Computer Science and Information Technology, pp. 62-72, April, 2009.
- [26] A. Kumar, L.C. Reddy and P. Hiremath, *Performance Comparison of Wireless Ad hoc Network Routing Protocols*, IEEE International Journal of Computer Science and Network Security, Vol. 8, No. 6, June, 2008.
-

-
- [27] G. Lakshmikanth M.A. Gaiwak and P.D. Vyavahare, *Simulation Based Comparative Performance Analysis of Ad hoc Routing Protocols*, TENCON, pp. 1-5, March, 2008.
- [28] E. Chatzistavros and G. Stamatelos, *Comparative Performance Evaluation of Routing Algorithms in IEEE 802.11 Ad Hoc Networks*, ICT'09 Proceedings of the 16th international conference on Telecommunications, pp. 19-24, May, 2009.
- [29] C. Mbarushimana and A. Shahrabi, *Comparative Study of Reactive and Proactive Routing Protocols Performance in Mobile Ad Hoc Networks*, Advanced Information Networking and Applications Workshops, 2007, AINAW '07., Vol. 2, pp. 679-684, August, 2007.
- [30] S. Mohseni, R. Hassan, A. Patel and R. Razali, *Comparative review study of reactive and proactive routing protocols in MANETs*, 4th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (DEST), pp.304, October, 2010.
- [31] S. Corson and J. Macker, *MANET: Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations*, RFC 2501. IETF Network Working Group, January, 2009.
- [32] K. Kowalic and M. Davis, *Why are there so many routing protocols for wireless mesh networks?*, Irish Signal and Systems Conference, June, 2006.
- [33] K. Yang, J. Ma and Z. Miao, *Hybrid Routing Protocol for Wireless Mesh Network*, IEEE International Conference on Computational Intelligence and Security, pp. 547-551, December, 2009.
- [34] M. Cornils, M. Bahr and T. Gamer, *Simulative Analysis of the Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP)*, 2010 European Wireless Conference, pp. 536 - 543, April, 2010.
- [35] A. Zakrzewska, L. Koszalka, I.P. Koszalka and A. Kasprzak, *Analysis of Routing Protocol Performance in Wireless Mesh Networks*, International Conference on Computational Science and Its Applications (ICCSA), pp. 307-310, June, 2010.
- [36] A. Pirzada, M. Portmann and J. Indulska, *Performance Comparison of Multi-Path AODV and DSR Protocols in Hybrid wireless Mesh Network*, Computer Communications Vol. 5, No. 31, pp.885-895, 2008.
- [37] A. Pirzada and M. Portmann, *High Performance AODV Routing Protocol for Hybrid Wireless Mesh Networks*, MobiQuitous 2007, pp. 1-5, 2007.
- [38] U. Ashraf, G. Juanole and S. Abdellatif, *Evaluating Routing Protocols for the Wireless Mesh Backbone*, IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, pp. 40-47, September, 2007.
- [39] J. Chen, Y. Lee, D. Maniezzo and M. Gerla", *Performance Comparison of AODV and OFLSR in Wireless Mesh Networks*, in Proceedings of the Fifth Annual Mediterranean Ad hoc Networks, pp. 271-278, 2006.
-

-
- [40] S. Singh, S. Sran and T. Chand, *Performance Comparison of AODV, OLSR and OFLSR in Wireless Mesh Networks*, Proceedings of 2nd National Conference on Challenges and Opportunities in Information Technology (COIT-2008), pp. 122-125, March, 2008.
- [41] A. Zakrzewska, Koszalka and I.P. Koszalka, *Performance Study of Routing Protocols for Wireless Mesh Networks*, IEEE International Conference on Systems and Engineering, pp. 331-336, August, 2008.
- [42] A. Pirzada, M. Portmann and J. Indulska, *Evaluation of Multi-Radio Extensions to AODV for Wireless Mesh Networks*, MobiWac 06, pp. 45-51, October, 2006.
- [43] P. Tingrui, Z. Wenli, Z. Zhaoxiao and P. Tao, *An Improved Hierarchical AODV Routing Protocol for Hybrid Wireless Mesh Network*, International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, pp. 588-593, 2009.
- [44] A. Bose and S. Nandi, *Implementation and Performance Evaluation of AODV in Wireless Mesh Networks using NS-3*, IEEE International Conference on Educational Technology and Computer, pp. 298-303, 2010.
- [45] M.A. Rahman, M.S. Azad, F. Anwar and A.H. Abdalla", *A Simulation Based Performance Analysis of Reactive Protocols in Wireless Mesh Networks*, IEEE International Conference on Future Networks, pp. 268-272, 2009, March.
- [46] Y. Yu, Y. Peng, L. Guo and X. Wang, *Performance Evaluation for Routing Protocols in Wireless Mesh Networks*, IEEE International Conference on Educational and Information Technology, pp. 107-110, 2010.
- [47] R. Draves, J. Padhye and B. Zill, *Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks*, in Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking, 2004.
- [48] P. Hu, M. Portmann and A. Pirzada, *Experimental Evaluation of AODV in a Hybrid Wireless Mesh Network*, The 5th Workshop on the Internet, Telecommunications and Signal Processing WITSP'06, pp. 1-6, Vol. 1, No. 1, June, 2006.
- [49] The Network Simulator - ns2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, 2009.
- [50] P. Barford and M. Crovella, *Generating Representative Web Workloads for Network and Server Performance Evaluation*, In Proceedings of ACM SIGMETRICS'97, pp. 151-160, June 1998.
- [51] X. Yang, *Designing Traffic Profiles for Bursty Internet Traffic*, IEEE Global Telecommunications Conference, 2002. GLOBECOM '02, pp. 2149 - 2154, Vol.3, March, 2002.
- [52] S. Panda and R. Mohapatra. *Implementation and Comparison of Mobility Models in ns2*, Bachelor of Technology Thesis, Department of Computer Science and Engineering National Institute of Technology, Rourkela, 2009.
-

-
- [53] J. Yoon, M. Liu and B. Noble, *Random Waypoint Considered Harmful*, INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies , pp. 1312-1321, Vol. 2, 2003.
 - [54] I. Gruber, O. Knauf and H. Li, *Performance of Ad Hoc Routing Protocols in Urban Environments*, In Proceedings of European Wireless 2004, EW'2004, Barcelona, Spain, February 24 - 27, 2004.
 - [55] C. Perkins, E. Roger and S. Das, *Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*, RFC 3561. IETF Network Working Group, July, 2003.
 - [56] G. Sklyarenko, *AODV Routing Protocol Abstract*, Frei Universitat Berlin
 - [57] C. Perkins and P. Bhagwat, *Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers*, SIGCOMM 94, pp. 234-244, Vol. 24, No. 4, 1994.
 - [58] L. Lindqvist, *Counting to Infinity*, Seminar on Internetworking, Helsinki University of Technology Telecommunications, Software and Multimedia Laboratory, 2004.
-



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Análisis de protocolos de encaminamiento
para redes inalámbricas tipo
malla en modo infraestructura

Idónea Comunicación de Resultados

para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

presentada por

Carlos Ernesto Carrillo Arellano

Asesor:

Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos

Defendida públicamente en la UAM-Iztapalapa el 12 de septiembre de 2011 a las 12:00 hrs
frente al jurado integrado por:

Presidente : Dr. Raúl Teodoro Aquino Santos, Universidad de Colima, Facultad de Telemática
Secretario : Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos, UAM - Iztapalapa, Redes y Telecomunicaciones
Vocal : Dr. Enrique Rodríguez de la Colina, UAM - Iztapalapa, Redes y Telecomunicaciones