

Universidad Autónoma Metropolitana

Unidad Azcapotzalco

División de Ciencias Básicas e Ingeniería
Licenciatura en Ingeniería en Computación

Proyecto de integración en ingeniería en computación

Nombre del proyecto:

Análisis del protocolo de enrutamiento AODV para redes
ad hoc en IWMN.

Alumno:

Jorge Luis Márquez Ramírez
209364843
al209364843@alumnos.azc.uam.mx

Asesor:

M. en C. José Alfredo Estrada Soto
Titular C
Departamento de Electrónica
jestrada@correo.azc.uam.mx

México D.F., a 9 de Julio de 2014

Resumen

Las redes inalámbricas en malla (Wireless Mesh Networks – WMN) son un nuevo paradigma de las redes de datos. Estas redes se pueden adaptar en diferentes aplicaciones, tales como: redes comunitarias, extensión inalámbrica de redes cableadas, sistemas automatizados, sistemas de transporte inteligente, entre otros. Una variante de estas redes son las redes en malla en modo infraestructura (infrastructure WMN – iWMN) que actualmente es la variante más fuerte para extender la cobertura de las redes cableadas, en particular el Internet. Éstas ofrecen conectividad inalámbrica a usuarios móviles con características muy atractivas, entre las que destacan: bajo costo, eficiencia, escalabilidad y sobre todo su facilidad para ser desplegadas.

Las redes iWMN están conformadas por dos elementos fundamentales: la troncal de la red y el conjunto de usuarios móviles. La troncal de la red también es llamada *backbone*, está integrada por nodos inalámbricos estáticos capaces de encaminar datos de manera cooperativa (multihopnetwork), permitiendo así el establecimiento de rutas de comunicación entre los usuarios móviles, incluso entre estos usuarios móviles y otras arquitecturas de red. Por esta razón cada uno de los nodos que conforman la troncal tiene también funciones y responsabilidades propias de un dispositivo de enrutamiento. Debido a lo anterior, es necesario utilizar protocolos de enrutamiento 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.

Las redes ad hoc son llamadas descentralizadas, pues no dependen de una infraestructura pre-existente, como router en redes cableadas o puntos de acceso en redes inalámbricas. En lugar de estos, cada nodo participa en el enrutamiento mediante el reenvío de datos hacia otros nodos. Típicamente cualquier conjunto de redes donde todos los nodos tienen el mismo estado dentro de la red es llamada una red ad hoc, en ella los nodos son libres de asociarse con cualquier otro dispositivo en la red.

Las redes ad hoc permiten la adhesión de nuevos dispositivos, tan sólo con estar dentro del rango de alcance de un nodo ya perteneciente a la red establecida. El principal inconveniente de estas redes radica en el número de saltos que deben dar los paquetes antes de llegar a su destino.

A pesar de las notorias diferencias entre las redes ad hoc e iWMN, los protocolos de enrutamiento diseñados específicamente para las primeras han sido considerados como una plataforma viable para atender los problemas de enrutamientos en las últimas. Sin embargo existe una gran cantidad de dudas sobre la eficiencia inducida por estos esquemas de enrutamiento en la arquitectura de red iWMN, llegándose a afirmar que el desempeño no podría ser óptimo.

Este trabajo de investigación busca contribuir a los esfuerzos de evaluación de desempeño del protocolo de enrutamiento Ad hoc OnDemandDistance Vector (AODV) en iWMN, en busca de evidencia que permita identificar los pros y contras de esta adopción. Las razones principales para la adopción del protocolo de enrutamiento

AODV son: su funcionalidad distribuida, su exitosa aceptación en redes ad hoc y es uno de los protocolos más utilizados en redes ad hoc.

Para lograr lo anterior se realizará diseño e implementación de mejoras que permitan adaptar el comportamiento distribuido del protocolo de enrutamiento a una arquitectura de red jerárquica como lo es la de iWMN. A través de la construcción de una red inalámbrica con capacidad de crecimiento que permita un escenario de simulación y conjunto de parámetros de evaluación; que muestre la eficiencia inducida para el esquema de enrutamiento AODV. La interpretación y análisis de los resultados obtenidos, permiten identificar características para el diseño o adaptación de futuros protocolos de enrutamiento para iWMN. Los resultados finales de este trabajo indican que el esquema de enrutamiento induce un desempeño aceptable bajo condiciones particulares en la red. El protocolo AODV muestra un bajo nivel de descubrimiento de ruta, y una baja tasa de pérdida de paquetes, dentro de un ambiente con poco tráfico. Su comportamiento reactivo se ha adaptado eficazmente a la arquitectura jerárquica de iWMN, a los cambios constantes en la topología de la red. La troncal de la red recibe la mayor densidad de tráfico.

Contenido

Resumen	1
Introducción	1
Justificación	2
Objetivos.....	3
Objetivo General	3
Objetivos Específicos	3
Redes inalámbricas.....	3
Redes inalámbricas ad hoc	3
Redes inalámbricas en modo infraestructura	4
Redes inalámbricas híbridas.....	5
Redes inalámbricas en malla	5
Redes inalámbricas de clientes en malla	6
Redes inalámbricas en malla en modo infraestructura	6
Composición de las iWMN.....	7
Características de las iWMN.....	8
Enrutamiento en redes inalámbricas	9
Protocolos de enrutamiento	9
Algoritmo vector-distancia	10
Enrutamiento en redes inalámbricas	10
Algoritmo del estado del enlace.....	11
Enrutamiento en redes ad hoc	11
Enrutamiento en iWMN	12
Principales diferencias entre las redes ad hoc e iWMN.....	14
Escenario de evaluación	15
Medidas de desempeño	16
Evaluación del protocolo AODV	17
Descubrimiento de la ruta.....	17
Mantenimiento de la ruta	18
Propuesta de mejora al protocolo de enrutamiento AODV	19
Análisis y discusión de resultados	19
Tasa de entrega promedio.....	20
Latencia en el descubrimiento de la ruta	21
Cantidad de paquetes perdidos	21

Conclusiones	22
Referencias	23

Introducción

La información es la base fundamental para la construcción y difusión del conocimiento, el cual es necesario para el desarrollo de la sociedad en sus diferentes sectores, desde los científicos y tecnológicos hasta las relaciones humanas y diferentes escenarios cotidianos. Las sociedades modernas han sufrido un cambio drástico para el acceso a la información, hoy en día uno de los medios más importantes para el acceso de esta es *el Internet*. Desde la aparición del Internet se obtuvo un mayor acceso a la información para más individuos, en la actualidad contamos con tecnologías que nos permiten acceder a esta gran base de información desde casi cualquier lado: *tecnología inalámbrica*. La aparición de dispositivos portátiles (computadoras portátiles, teléfonos celulares, tablets, netbooks) ha facilitado en gran medida el acceso a la información, incluso estos dispositivos nos acompañan de manera cotidiana, transformando el esquema de acceso a la información por completo. Todos estos aspectos en conjunto dan origen a la demanda de *conectividad total*, esto es, la posibilidad de acceder a la información a cualquier hora y en cualquier lugar. En la actualidad, una forma de atacar esta demanda es por medio de la conectividad inalámbrica, si bien exitosa, aun se ve limitada 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 un nuevo paradigma de las redes de datos. Estas redes se pueden adaptar en diferentes aplicaciones, tales como: redes comunitarias, extensión inalámbrica de redes cableadas, sistemas automatizados, sistemas de transporte inteligente [1, 2, 3, 4], entre otros. Una variante de estas redes son las redes en malla en modo infraestructura (infrastructure WMN – iWMN) que actualmente es la variante más fuerte para extender la cobertura de las redes cableadas, en particular el 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 red puede atender de manera eficiente la demanda de conectividad total, colocándose como una solución prometedora en diversos escenarios de aplicación.

Las redes iWMN están conformadas por dos elementos fundamentales: la troncal de la red y el conjunto de usuarios móviles. La troncal de la red -también llamada *backbone*- está integrada por nodos inalámbricos estáticos capaces de encaminar datos de manera cooperativa (*multihopnetwork*), permitiendo así el establecimiento de rutas de comunicación entre los usuarios móviles e incluso entre estos usuarios móviles y otras arquitecturas de red. Por esta razón, cada uno de los nodos que conforman la troncal tiene también funciones y responsabilidades propias de un dispositivo de enrutamiento. Debido a lo anterior, es necesario utilizar protocolos de enrutamiento 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.

Tanto las redes ad hoc como las iWMN están estrechamente relacionadas, ambas arquitecturas comparten similitudes tales como redes inalámbricas multihop, nodos

móviles, redes auto-administradas, entre otras, así como diferencias importantes: la naturaleza estática de los nodos que conforman la troncal de la red, la ausencia de limitantes energéticas, el eficiente desvío del tráfico dentro de la troncal, el requerimiento heterogéneo de calidad de servicio (QoS) por parte de las aplicaciones que utilizan la red y el alto grado de escalabilidad, por mencionar algunas. Los protocolos de enrutamiento para las redes ad hoc están diseñados principalmente para mantener la conectividad de extremo a extremo, así como para lidiar con los efectos de la movilidad de los nodos. Estos esquemas de enrutamiento han sido considerados como plataforma viable para resolver los problemas de enrutamiento en las redes iWMN; sin embargo, las diferencias entre las arquitecturas y el objetivo perseguido por los protocolos de enrutamiento diseñados específicamente para redes ad hoc, han originado cuestionamientos sobre el desempeño ocasionado por dichos protocolos en iWMN, llegándose a afirmar que el desempeño de estos no podría ser óptimo.

Justificación

Las iWMN, ofrecen una solución viable y prometedora para ampliar de manera inalámbrica la cobertura de las redes cableadas, en específico el Internet. Las iWMN son una variante de redes inalámbricas, estas redes ofrecen una manera novedosa de atender usuarios móviles, mediante la colaboración de los nodos de la red en el establecimiento de trayectorias de comunicación, logrando atender de manera eficiente la demanda de conectividad total.

El protocolo AODV es uno de los protocolos más usados en el enrutamiento por vector de distancia en redes inalámbricas, es materia de este proyecto por su eficiencia para realizar el enrutamiento. Existen otros protocolos de enrutamiento como DSDV (Destination Sequenced Distance Vector) sin embargo, no es tan eficiente y tiende a generar bucles [1]. Este problema es causado por el método de selección de nodos para el enrutamiento, pues se basa en información que se obtiene sobre cada nodo inmediato, la cual comúnmente es obsoleta, esto no sucede con AODV.

Se esperan resultados que den evidencia que respalde o refute la adopción del protocolo de enrutamiento AODV diseñados específicamente para redes ad hoc en iWMN. Este protocolo de enrutamiento fue diseñado para redes ad hoc y se implementa y ejecuta de manera distribuida sobre los nodos que conforman la red, en donde todos los nodos de la red tienen el mismo conjunto de responsabilidades.

Uno de los aportes más sobresalientes será el conocimiento que se tendrá en cuanto a las posibles mejoras que se puedan lograr y adaptar al comportamiento distribuido del protocolo de enrutamiento AODV en una arquitectura de red jerárquica como lo es la de una iWMN, que hasta la fecha aún no cuenta con evaluaciones detalladas y en consecuencia la cantidad de información existente para la adopción de estos protocolos a las redes iWMN es muy limitada.

Objetivos

Objetivo General

- Evaluar el protocolo de enrutamiento AODV (Ad hoc On demand Distance Vector) en busca de evidencia que permita respaldar o refutar la adopción de este protocolo de enrutamiento diseñado específicamente para redes ad hoc en iWMN.

Objetivos Específicos

- Construir una red inalámbrica para realizar pruebas a ambos protocolos (original y modificado).
- Proponer un conjunto de adecuaciones para el esquema de enrutamiento, que permita su ejecución en una arquitectura de red iWMN.
- Comparar, a través de simulaciones en la red construida, el desempeño de las adecuaciones sobre el esquema de enrutamiento iWMN.
- Evaluar el desempeño entre el original para redes ad hoc y el modificado para redes iWMN mediante pruebas de tasa de entrega promedio, latencia de descubrimiento de la ruta y cantidad de pérdida de paquetes a través de la red construida, para obtener qué tan eficiente es el protocolo bajo redes iWMN.

Redes inalámbricas

Los avances tecnológicos han alterado nuestro modo de vida significativamente, el acceso e intercambio de información puede ocurrir casi desde cualquier parte del mundo a través del internet por medio de un acceso inalámbrico. Esto demanda arquitecturas de red que permitan compartir información entre estos dispositivos de manera económica, eficiente, y confiable.

Desde la aparición de las redes inalámbricas en 1979 [5], las redes inalámbricas se han consolidado como una de las clasificaciones más importantes de las redes de datos. Las redes inalámbricas son una de las arquitecturas más aceptada y difundida gracias al incontable número de aplicación y escenarios de uso en donde la movilidad es el principal factor. Estas redes están conformado por dispositivos que utilizan el aire como medio de transmisión no guiado para establecer un canal de comunicaciones. El principal objetivo de estas redes es: permitir la movilidad mientras que se realiza el intercambio de información entre dispositivos móviles o dispositivos móviles y otras arquitecturas de red. En esta sección del proyecto se busca clasificar de manera fundamental cómo se organizan las redes inalámbricas respecto a la arquitectura de una red de datos cableada, así como resaltar algunas propiedades importantes.

Redes inalámbricas ad hoc

Las primeras redes inalámbricas ad-hoc fueron desarrolladas por DARPA (Agencia de Investigación de Proyectos Avanzados de Defensa, EE.UU.) en los años 70 y operaban en radiofrecuencias UHF (*packet radio networks*). Las pioneras fueron ALOHAnet y PRNET. Esta arquitectura de red está compuesta por nodos móviles capaces de establecer conectividad entre ellos a través de enlaces inalámbricos, sin necesidad de contar con un sistema de control de comunicaciones centralizado (router en redes cableadas) o una infraestructura especial tal como se muestra en la Figura 1. Las redes inalámbricas ad hoc son sistemas auto-administrados, en donde los factores de configuración, reparación y organización de la misma se realiza automáticamente por los nodos que la componen.

Cada nodo inalámbrico perteneciente a una red ad hoc cuenta con rango de comunicación limitado, por lo que para lograr una comunicación con este nodo es necesario de la colaboración de otros de la red para establecer una ruta para intercambiar información con él. En estas redes cada nodo brinda recursos y contribuye de manera directa en el enrutamiento de información, actuando cada nodo como un salto intermedio (*multihopnetwork*). Debido a la ausencia de una infraestructura compleja para su operación, han generado una gran demanda dentro del mercado de telecomunicaciones móviles.



Figura 1: Red inalámbrica ad hoc

Redes inalámbricas en modo infraestructura

Las redes inalámbricas en modo infraestructura son actualmente una de las arquitecturas de red más populares. Éste tipo de red ofrece 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 el internet. A diferencia con las redes ad hoc, las redes en modo infra estructura cuentan con un dispositivo centralizado llamado *punto de acceso - AP-* que actúa como interfaz de comunicaciones con la red cableada y coordina las comunicaciones entre los dispositivos móviles [6], como se muestra en la

Figura 2. Esto tiene un impacto positivo en la cantidad de información que se puede procesar y en la velocidad, pues concreta la organización y administración de la red en el AP. Este tipo de redes se utiliza eficazmente para ampliar inalámbricamente la cobertura de las redes cableadas. Este tipo de redes cuenta con la desventaja del alcance de los AP, pues el rango con el que se puede ampliar una red cableada depende del rango del AP, por lo que se tiene un impacto negativo en la planeación de la escalabilidad para crear células de cobertura, en los recursos y el tiempo necesarios para ampliar la cobertura de la red.

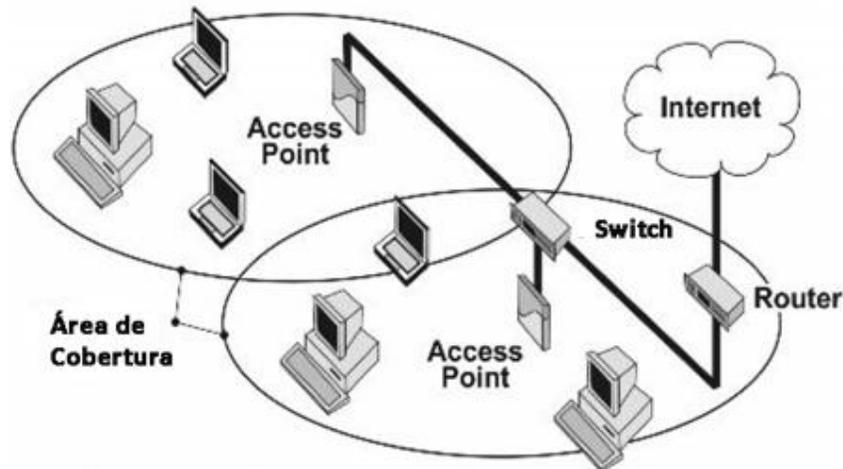


Figura 2: Red inalámbrica en modo infraestructura.

Redes inalámbricas híbridas

Las redes inalámbricas híbridas combinan el funcionamiento de tanto redes ad hoc como de las redes en modo infraestructura. La conectividad que ofrece este tipo de redes es muy flexible, lo que permite que sea adaptable a diversas aplicaciones tanto móviles como estáticas. Bajo este esquema los AP actúan como interfaces entre los dispositivos móviles y cableados, mientras que los dispositivos móviles son capaces de encaminar información entre ellos y, al mismo tiempo, pueden acceder de manera directa o indirectamente a la red cableada, lo que incrementa el desempeño de la red, lo que genera una arquitectura tolerante a fallas. Entre las desventajas de esta combinación esta la libertad de movimiento de los nodos móviles, lo que provoca cobertura variable y poco estable.

Redes inalámbricas en malla

A pesar de las grandes ventajas ofrecidas por las redes inalámbricas ad hoc, el éxito de éstas se ha dado en sectores y aplicaciones muy particulares. Las aplicaciones de sectores militares, de emergencias y aplicaciones de seguridad se adaptaron rápida y eficientemente, por lo que estos sectores dominaron las líneas de investigación para esta

arquitectura de redes. No obstante esta arquitectura no ha mostrado una aceptación generalizada por los usuarios de redes inalámbricas, este debido al deseo generalizado de acceso a la información que reside en internet. Por otro lado las redes inalámbricas en modo infraestructura han mostrado una clara aceptación por parte de los usuarios de dispositivos móviles, esto debido a que ofrece conectividad hacia redes cableadas por medio de acceso inalámbrico y en particular al Internet. Sin embargo tratar de ofrecer acceso desde cualquier punto, hacia el Internet, se ve limitado por los requerimiento de la infraestructura, planificación y tiempo de implementación. Las redes en malla surgen como una alternativa para resolver algunas de las limitaciones de las arquitecturas mencionadas anteriormente. Combinadas las redes ad hoc y las redes en modo infraestructura, las redes inalámbricas en malla ofrecen un conjunto de propiedades atractivas, entre los que destaca la ampliación inalámbrica de la cobertura de redes cableadas.

Las redes inalámbricas en malla (WMN estándar IEEE 802.11s) son una propuesta tecnológica que destaca la adaptabilidad de 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, entre otros [7]. Las redes WMN basan su arquitectura en una red de bajo costo, auto-administrable y confiable, lo que ha generado gran interés por la versatilidad que ofrecen para atender eficientemente distintas necesidades.

Por las funcionalidades y características de cada uno de los nodos que compone 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 [8].

Redes inalámbricas de clientes en malla

Las redes inalámbricas de clientes en malla (*Client Wireless Mesh Networks – cWMN*) son redes par a par –peer to peer – entre dispositivos inalámbricos móviles. En esta arquitectura de red los nodos que conforman la red son capaces de enrutar información sin necesidad de utilizar dispositivos de enrutamiento dedicados, estas redes tienen un comportamiento muy similar al que tienen las redes ad hoc. Las funciones de configuración y enrutamiento recaen en los dispositivos móviles que conforman la red. En las cWMN, un paquete de datos puede pasar por varios nodos que conforman la red, para llegar al nodo destino, al igual que en las redes ad hoc, la cooperación de los nodos que conforman la red es necesaria para lograr la comunicación de nodos suficientemente alejados para comunicarse entre ellos.

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 arquitectura es actualmente una de las alternativas más viables para extender la cobertura de las redes cableadas [9]. Las iWMN brindan acceso inalámbrico a usuarios móviles, así como redes heterogéneas, y permite establecer conectividad entre estos

elementos. Uno de los objetivos principales de esta arquitectura de red es atender la creciente demanda de conectividad total.

A diferencia de la arquitectura de red ad hoc o cWMN, –carente de jerarquía en los nodos que la componen– 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 [10]. Las iWMN se componen por dos elementos fundamentales, la troncal de la malla y el conjunto de usuarios móviles. La troncal de una iWMN se compone por nodos inalámbricos estáticos, por lo que, se asume que éstos no tienen restricciones de energía, de procesamiento o de almacenamiento. Cada nodo que compone la troncal de la red posee un rango de comunicaciones limitado, de tal forma que la cooperación entre estos nodos es la que permite establecer rutas de comunicación entre ellos. Cada nodo de la troncal brinda sus recursos para enrutar información a través de la red y colabora en el establecimiento de rutas de comunicación (*multihopnetwork*). De esta forma la troncal de la red ofrece servicio de interconexión de bajo costo, confiable y eficiente, que permite el establecimiento de comunicación entre usuarios móviles, o bien entre usuarios móviles y otras arquitecturas de red.

Composición de las iWMN

La organización jerárquica de la iWMN se ilustra en la Figura 3. Los nodos que forman parte de esta arquitectura de red y las funciones de cada uno de ellos, se organiza de la siguiente manera [10]:

- **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 de la troncal para hacerlos llegar hasta su destino.
- **MP** – Punto de la malla (*Mesh Point*) Los MPs solo realizan funciones de enrutamiento de información dentro de la troncal de la red.
- **STA** – Estación móvil (*Mobile Station*) Las STAs (usuarios) utilizan la troncal de la red para establecer comunicaciones, es decir, el intercambio de datos entre STAs, o bien entre STAs y otras arquitecturas de red.

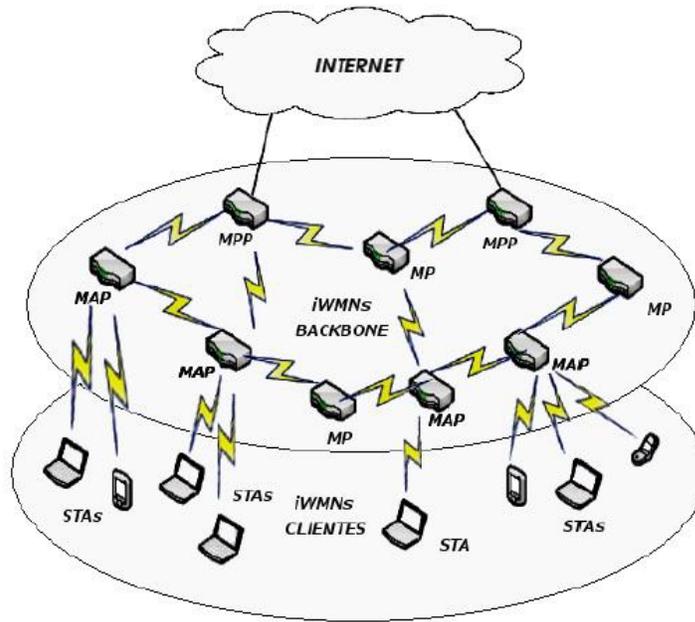


Figura 3: Red inalámbrica en malla en modo infraestructura.

Características de las iWMN

La arquitectura de red de las iWMN es considerada una arquitectura híbrida, dado que ésta combina las características y propiedades de otras arquitecturas de red, tales como redes ad hoc y redes en modo infraestructura. A continuación se resumen algunas de las características de esta arquitectura de red:

1. Los nodos inalámbricos que conforman la troncal de la red poseen un rango limitado de comunicación; por esta razón estos nodos deben cooperar entre ellos para el establecimiento de rutas. Por lo que cada nodo que forma parte de la troncal asume las responsabilidades y funcionalidades de un dispositivo de enrutamiento.
2. Los nodos que forman parte de la troncal no tienen movilidad, permanecen de forma estática en puntos estratégicos, mientras que para los clientes de la red estos nodos se consideran aleatorios e ilimitados. Esto impacta de manera directa en la topología de la red, induciendo cambios dinámicos en la misma.
3. Los nodos que conforman la troncal de la red generalmente no tienen restricciones sobre energía, procesamiento y almacenamiento, mientras que los clientes generalmente tienen restricciones sobre estos parámetros.
4. La arquitectura iWMN tiene como característica obligatoria ser compatible y operativa con otras arquitecturas de red, dado que deben soportar flujos de

información hacia y desde otras arquitecturas de red, además de los flujos p2p (*Peer-to-Peer*) entre usuarios de la red.

5. Una de las funciones principales de esta arquitectura es interconectar diferentes arquitecturas de red, por lo que la mayoría del tráfico de la red pasará a través de los MPP's. De esta forma el tráfico tendrá una distribución de red repartida en la red, pues a medida que la distancia entre un nodo de la troncal y el MPP disminuye, la cantidad de tráfico en este primer nodo aumentará, generando constantemente cuellos de botella alrededor de los MPP's.

Enrutamiento en redes inalámbricas

El enrutamiento se define como el conjunto de funciones necesarias para determinar los nodos intermedios por donde debe viajar un paquete, desde un nodo fuente hasta un nodo destino, en una red *multihop*. Los problemas de enrutamiento se pueden dividir en dos problemas de optimización, uno en donde se busca la ruta más corta o la ruta más barata para conectar dos nodos [12]. Las propiedades particulares de las redes inalámbricas se traducen en un reto para el diseño de protocolos de enrutamiento. Los protocolos que se utilizan para redes cableadas, sin importar su popularidad o éxito, no son viables para su uso en redes inalámbricas debido a la movilidad y variabilidad de los enlaces inalámbricos. Esta sección del proyecto busca describir el problema del enrutamiento en redes inalámbricas y detallar las ventajas que ofrecen las iWMN para el diseño de éstos.

Protocolos de enrutamiento

Una red *multihop* es un sistema de comunicaciones conformado por múltiples nodos capaces de enrutar información. En este tipo de redes, los paquetes pueden ser enviados por diferentes rutas a través de los nodos para transitar desde un nodo fuente hasta un nodo destino. El objetivo de un protocolo de enrutamiento es hallar una ruta óptima de comunicaciones para intercambiar información entre el nodo fuente y el nodo destino. Las funciones principales que realiza un protocolo de enrutamiento consisten en: el descubrimiento de rutas de enrutamiento, selección de la ruta óptima y el mantenimiento de ésta.

Para descubrir el conjunto de posibles rutas de enrutamiento, el protocolo de enrutamiento utiliza mecanismos para recolectar información que le permitan determinar los puntos intermedios por los que deben “brincar” los paquetes de información hasta su destino. Es este proceso el cual se optimiza a través de la selección de una ruta de comunicaciones, que puede ir desde la minimización del retardo y de las pérdidas, o bien la maximización del caudal de datos (*throughput*), entre otras. Por otro lado el proceso de mantenimiento de la ruta monitorea el estado de la ruta de comunicaciones y reacciona, mediante mecanismos de control, ante una eventual dificultad en la misma.

El método en que cada protocolo de enrutamiento resuelve el problema de enrutamiento es diferente, y depende del algoritmo que cada protocolo ejecuta, por ejemplo, un protocolo puede utilizar un mecanismo de recolección de información reactivo en conjunto con la métrica de minimización de retardo y otro podría implementar eso y además un esquema de monitoreo de conectividad en los enlaces de la ruta seleccionada. La mayor parte de los protocolos de enrutamiento se basan en dos importantes algoritmos: estado del enlace y vector-distancia [13].

Algoritmo vector-distancia

El algoritmo vector-distancia es muy utilizado en el diseño de protocolos de enrutamiento y es conocido como el algoritmo Bellman-Ford. Este algoritmo es capaz de determinar las rutas de menor costo con respecto a una medida de desempeño específica, como lo son: retardo, longitud, tasa de error, entre otros. Su funcionamiento radica en que cada nodo de la red estima el costo de la ruta para comunicarse con un nodo destino. Cada nodo i administra una tabla de enrutamiento en la cual almacena el nodo inmediato que permite alcanzar al nodo destino j de manera óptima. El mecanismo que se utiliza es el siguiente: sea D_{ij} el costo de la ruta óptima para comunicar al nodo i con el nodo j y se k_m cada uno de los m nodos vecinos de i . Los costos de los enlaces entre los nodos i y k_m se defino 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 la ecuación de Bellman [13], expresada como:

$$D_{i,i} = 0, \quad i(1.1)$$

$$D_{i,j} = \min (d_{i,k_m} + D_{k_m,j}) \text{ para } i \neq j \quad (1.2)$$

Con la condición inicial:

$$D_{i,j} = \infty \text{ para } i \neq j \quad (1.3)$$

Enrutamiento en redes inalámbricas

Para resolver la ecuación (1.2), cada nodo i de la red utiliza la información proveniente de sus m nodos vecinos, recolectando la distancia óptima $D_{k_m,j}$. 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 se realiza periódicamente y de forma distribuida a lo largo de la red. La complejidad computacional de este algoritmo es $O(N^3)$ donde N es el número de nodo que componen la red.

Algoritmo del estado del enlace

En este algoritmo, la red se convierte en una gráfica de nodos y enlaces interconectados. Cada nodo posee una visión local de la red, en base a las propiedades de los enlaces que lo conectan con sus nodos vecinos, de aquí el término de estado del enlace. Bajo éste algoritmo de enrutamiento, cada nodo distribuye el costo de los enlaces que lo conectan con sus nodos vecinos a todos los otros nodos de la red. La 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. De esta forma cada nodo tiene una “visión” general de la topología de la red. El procedimiento más común para que los nodos reciban toda esta información es el inundado (*flooding*), en donde cada nodo que conforma la red recibe información de algún nodo, a su vez cada uno de estos nodos es responsable de reexpedir esta información hacia sus nodo vecinos; este proceso 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, entre los cuales el más popular posiblemente es Dijkstra.

Enrutamiento en redes ad hoc

El enrutamiento en las redes con arquitectura ad hoc tiene como objetivo establecer trayectorias de comunicación entre los dispositivos inalámbricos que conforman la red. Este tipo de redes, tienen características, previamente analizadas en este documento, que provocan que el enrutamiento enfrente retos complejos, entre los que destacan:

- **Topología dinámica** – Este es un aspecto muy problemático para un protocolo de enrutamiento en redes ad hoc, pues el movimiento aleatorio de los nodos que forman parte de la red origina cambios constantes en la topología de la red. Esta problemática demanda una creciente generación de paquetes de señalización que permitan detectar y responder oportunamente a cambios en la topología.
- **Enlaces asimétricos**–Las redes cableadas comúnmente tienen enlaces simétricos, a diferencia de las redes ad hoc, en las cuales el medio inalámbrico tiende a sufrir un comportamiento asimétrico, y a presentar variabilidad en las propiedades de los enlaces. Este comportamiento en los enlaces inalámbricos surge dada la calidad del enlace entre dos nodos, por ejemplo en una dirección la calidad puede ser diferente a la calidad presentada en dirección contraria.
- **Escalabilidad** – Las redes ad hoc pueden escalar rápidamente, la cantidad de nodos presente en la red es continuamente variable. Es por esta propiedad que un protocolo de enrutamiento no debe verse afectado por el número de elementos que conformen la red.

Un protocolo de enrutamiento en redes ad hoc debe tener, idealmente, un conjunto de propiedades que le permitan adaptarse eficientemente a las características de este tipo de arquitectura. Entre las propiedades ideales destacan las siguientes:

- **Funcionamiento distribuido** – Debido a que en esta arquitectura se carece de jerarquía y no existe ningún nodo centralizado, el protocolo de enrutamiento debe ser ejecutado de manera distribuida entre los elementos de la red.
- **Libre de ciclos** – El protocolo funciona con los recursos presentes en la red, éste debe ser capaz de optimizar estos recursos, de tal forma que las rutas de comunicación deben de evitar la presencia de ciclos, que se traduce en un desperdicio de ancho de banda, procesamiento y tiempo.
- **Adaptabilidad al medio** – Un protocolo de enrutamiento debe ser capaz de minimizar o utilizar inteligentemente los efectos negativos que ofrece la conectividad inalámbrica –unidireccionalidad, asimetrías, pérdidas de conectividad, etc. – sobre las comunicaciones.
- **Mínimo consumo energético** – Los nodos que componen las redes ad hoc tienen como característica su limitante energética. El protocolo debe ser capaz de tomar en cuenta esta limitante y reducir el consumo de energía, esto se traduce en una menor carga de procesamiento.
- **Múltiples trayectorias** – Por la naturaleza de los nodos móviles dentro de las redes ad hoc, un protocolo debe ser capaz de contemplar rutas alternativas que le permitan reaccionar de manera oportuna ante cualquier eventualidad en la red.
- **Escalable** – Un aumento significativo en el número de nodos que conforman la red no debe afectar las prestaciones de la red.

Enrutamiento en iWMN

El enrutamiento en las iWMN, debe considerar las características de la red, en específico debe considerar la jerarquía existente en esta arquitectura. Las métricas a utilizar en el protocolo de enrutamiento tienen una enorme influencia en el desempeño de la red misma.

El principal objetivo de las redes iWMN es ofrecer acceso inalámbrico a usuarios móviles y colaborar en el establecimiento de trayectorias de comunicación con otras arquitecturas de red. Para que este objetivo pueda cumplirse, los parámetros a optimizar en el protocolo de enrutamiento son: mantener conectividad de extremo a extremo, minimizar el retardo, optimizar el balance de la carga de la red, aumentar la confiabilidad y la escalabilidad de la red, uso eficaz del ancho de banda y maximizar el caudal de datos (*throughput*).

Las iWMN comparten características y funcionalidades de redes cableadas así como de redes inalámbricas ad hoc. Estas características provocan que esta arquitectura pueda ser llamada “hibrida”, por lo que los protocolos de enrutamiento se componen de una mezcla de problemas de ambas arquitecturas. A continuación se enumeran dificultades a las que un protocolo de enrutamiento iWMN debe enfrentarse:

1. El tráfico heterogéneo es una característica de las redes cableadas, como el Internet, que comparte con iWMN, estos flujos diversos requieren de calidad de servicio (*QoS*) diversos. Por este motivo el protocolo de enrutamiento debe ser capaz de atender estas necesidades tras optimizar algunos aspectos de desempeño en la red.
2. El número de dispositivos finales en iWMN puede llegar a ser muy grande, demandando una gran cantidad de recursos. Distribuir equitativamente ancho de banda y considerar las limitantes del mismo es un desafío para cualquier protocolo de enrutamiento en esta arquitectura.
3. El protocolo de enrutamiento debe ser capaz de reaccionar ante posibles conflictos en el medio inalámbrico, tales como interferencias y atenuaciones, degradación de los enlaces, entre otros.
4. La arquitectura jerárquica de iWMN provoca que la mayor parte del tráfico se concentre en los portales de la malla (MMPs), por lo que existirán zonas con alta densidad de tráfico. El protocolo de enrutamiento debe ser capaz de distribuir de manera eficiente el tráfico para evitar cuellos de botella en los canales.
5. La movilidad es una característica inherente en iWMN y puede provocar que la transmisión/recepción de paquetes de datos sea decadente. El protocolo de enrutamiento debe ser capaz de reaccionar ante cualquier cambio en la topología de la red.

Las iWMN presentan un conjunto de ventajas que pueden ser aprovechadas por los protocolos de enrutamiento, con objeto de mejorar el desempeño de la red. A continuación se enumeran algunas de ellas:

1. El medio de difusión permite que la información de un nodo sea recibida por diversos nodos del rango de transmisión con el mismo costo. Por lo que, el número de receptores puede aumentar exponencialmente por cada retransmisión y la posibilidad de utilizar múltiples rutas podría exponenciar la tasa de envío.
2. La escalabilidad de la troncal de la red, debido a la limitante movilidad de los nodos que la componen, permite diseñar protocolos de enrutamiento más robustos y eficientes.
3. El estándar 802.11 b/g permite la transmisión a diferentes velocidades, un protocolo de enrutamiento puede aprovechar esta propiedad para transmitir a

tasas óptimas dentro de un trayecto, optimizando el retardo de extremo a extremo.

4. La posibilidad de contar con múltiples puntos de acceso inalámbricos y diferentes canales de transmisión permiten realizar transmisión continuas. Esto podría incrementar el número de alternativas de enrutamiento y de esta forma, la capacidad de la red.

Teniendo en cuenta las dificultades y las ventajas que un protocolo de enrutamiento debe afrontar en iWMN, se pueden enumerar un conjunto de propiedades ideales que un protocolo de enrutamiento debe tener para iWMN:

1. El ancho de banda es una de los recursos más preciados en las redes, no siendo diferente en las iWMN, por lo que debe haber un manejo eficiente de éste, así como la utilización de técnicas que permitan incrementar su uso.
2. El protocolo de enrutamiento debe poder reaccionar ante cualquier falla en la red, por lo que debe ser capaz de aprovechar la existencia de múltiples trayectorias en iWMN.
3. La escalabilidad de la red es un reto para un protocolo de enrutamiento en iWMN, éste no debe alterarse a medida que el tamaño de la red aumenta.
4. Ciertas regiones de la red se saturaran fácilmente con tráfico, el protocolo de enrutamiento debe ser capaz de redirigir el tráfico para utilizar de manera más eficiente los recursos de la red.
5. Debido a la característica de movilidad de los nodos que componen la red, el protocolo de enrutamiento debe evitar la generación de ciclos, así como reducir los efectos negativos inherentes a esta característica.

Principales diferencias entre las redes ad hoc e iWMN

A continuación se resumen las principales diferencias entre las redes ad hoc y las iWMN:

1. En las redes iWMN los nodos que componen la red tienen jerarquía, por lo que cierto grupo de nodos tiene responsabilidades específicas, mientras que en una red ad hoc no existe tal distinción.
2. Las redes iWMN tienen el objetivo de actuar como extensión de una red cableada y es capaz de intercambiar información entre diferentes arquitecturas de red, mientras que las redes ad hoc son redes aisladas con el único fin de compartir información entre los usuarios que componen la red.

3. El tráfico en las redes iWMN se concentra en ciertos puntos de la red, como los MPPs, esto puede provocar cuellos de botella y afectar sustancialmente el desempeño de la red, mientras que las redes ad hoc el tráfico es distribuido uniformemente.
4. Las iWMN al ser funcionar como extensión inalámbrica de las redes cableadas tienen diferentes requerimiento de calidad de servicio, algo que no sucede en las redes ad hoc.
5. En las redes iWMN la existencia de MAPs permiten el soporte de una gran cantidad de clientes, contrario a las redes ad hoc, en donde los nodos tienen una cantidad reducida de nodos vecinos, por lo que el nivel de tráfico en iWMN es mayor.
6. Las iWMN requieren de una infraestructura esencial para su funcionamiento, la troncal de la red, mientras que ad hoc carece de una infraestructura.
7. Los cambios dinámicos en la topología en iWMN son menos frecuentes que en las redes ad hoc
8. En las redes ad hoc, todos los nodos que la componen tienen la capacidad de movilidad, mientras que en una red iWMN, los únicos que cuentan con esa capacidad son los nodos clientes.
9. Los nodos que componen una red ad hoc, tienen limitantes en el poder de procesamiento así como energético, estas limitantes no se ven presentes en los nodos que integran la troncal de la red en iWMN.

La adopción de protocolos de enrutamiento diseñados para redes ad hoc en iWMN ha generado dudas justificadas sobre su desempeño [14], y éstas han sido parcialmente contestadas mediante trabajos de investigación. Si bien el efecto de los protocolos específicos para red ad hoc no podría ser óptimo en iWMN, su evaluación contribuye a generar fundamentos para adecuar características propias de cada enrutamiento, en una propuesta de diseño para iWMN.

Escenario de evaluación

La evaluación del protocolo de enrutamiento AODV mediante simulaciones computacionales, requiere de un conjunto de medidas de desempeño que muestren que los cambios propuestos inducen en la red. La simulación debe representar de forma detallada una posible implementación del sistema. En esta sección del proyecto describiremos las características del escenario de evaluación propuesto así como las medidas de desempeño consideradas para los objetivos de este proyecto.

El simulador utilizado es ns2, es un simulador de eventos discretos con gran prestigio en la investigación en redes de datos. Esta herramienta es el resultado de esfuerzos conjuntos de investigadores y desarrolladores, principalmente de la universidad de Berkeley. El simulador ofrece herramientas que permiten la simulación de eventos en el área de redes, puede emular los eventos que suceden desde la capa física hasta la capa de aplicación. El simulador ofrece un intérprete de instrucciones OTcl. En el script OTcl se define, el escenario de simulación, las fuentes de tráfico de la red, los protocolos que serán utilizados, entre otras opciones. El script es interpretado por el simulador, los resultados de la simulación son entregados en un archivo de trazas que muestra los eventos sucedidos durante el tiempo de simulación.

Se seleccionó el simulador ns2 ya que permite la posibilidad de modificar o agregar código de programación, que permite ajustar la simulación a un determinado comportamiento.

El escenario de simulación propuesto cuenta con las siguientes características: para representar la arquitectura de la troncal se utilizó una formación de nodos estáticos integrada por 4 MAP's, 2 MP's y 1 MPP. Estos nodos se acomodan con 2 MP's en el centro de la red y los 4 MAP's alrededor de los MPs, específicamente 2 a un lado de cada MP, el MPP conectado directamente a los MP's. Esta configuración contempla un área de simulación de 1200m x 1200 m. El número de STA's varió 3 veces con los siguientes valores: {3, 5 y 7}. La posición inicial de los usuarios móviles es alrededor de los MAP's, generando movimientos que los obliguen a cambiar de MAP. Se utilizó intercambio de paquetes ftp e http para realizar la simulación con la conexión de internet.

Medidas de desempeño

Para evaluar el desempeño del protocolo de enrutamiento propuesto utilizaremos las siguientes medidas de desempeño:

Tasa de entrega promedio

Es la fracción de paquetes que llegan a su destino respecto al número total de paquetes enviados en la red.

$$\text{Tasa de entrega} = \frac{\text{Paquetes recibidos}}{\text{Paquetes enviados}} \times 100$$

Latencia en el descubrimiento de la ruta

Tiempo promedio que requiere un dispositivo para descubrir el camino por el cual el paquete debe viajar.

Cantidad de paquetes perdidos

La cantidad de paquetes perdidos con respecto al número total de paquetes enviados desde un nodo destino hasta un nodo fuente.

$$\text{Pérdida de paquetes} = (\text{Paquetes enviados} - \text{Paquetes recibidos}) \times 100$$

Evaluación del protocolo AODV

AODV pertenece a la clasificación de protocolos de enrutamiento reactivos, de tal forma que el procedimiento de selección y búsqueda de rutas 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 número de secuencia con el fin de mantener actualizada la información de enrutamiento. El número de secuencia es un número entero que se incrementa por cada paquete enviado por un nodo. Cada uno de los nodos posee un número de identificación único que permite completar el mecanismo de identificación de los paquetes. La combinación de estos valores permite distinguir información de enrutamiento actualizada, además de impedir la creación de bucles en las rutas.

AODV utiliza un mecanismo de descubrimiento de ruta basado en el esquema de petición/respuesta (*stop and wait*). En este esquema AODV envía en modo de difusión un paquete de descubrimiento de rutas, que inunda la red y tiene como objetivo llegar hasta el nodo destino, o bien algún nodo intermedio que conozca la ruta para comunicarse con el nodo destino. La respuesta al paquete de descubrimiento de ruta será enviada en modo *unicast* hasta el nodo fuente. El protocolo AODV almacena la información de enrutamiento en tablas de ruteo.

Descubrimiento de la ruta

El procedimiento de descubrimiento de la ruta inicia en el momento en el que un nodo requiere transmitir información y desconoce una ruta para hacer llegar dicha información hasta el nodo destino. Para realizar este procedimiento el protocolo AODV utiliza dos paquetes: el paquete de solicitud de ruta y el paquete de respuesta de ruta (*RREQ – Routersrequest* y *RREP-Routersreply*).

RREQ: 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 de difusión, inundando la red hasta hallar el nodo destino o bien hasta alcanzar a un nodo intermedio con un ruta válida para alcanzar el destino. El nodo recibe el paquete RREQ y verifica que no haya sido recibido con anterioridad a través del análisis de los identificadores, si el paquete no fue recibido con anterioridad, éste procesa el paquete. Cada nodo que procesa un RREQ y desconoce una ruta para el nodo destino, reexpide el RREQ y almacena de manera temporal información para el establecimiento de la ruta de vuelta, es decir, almacena el identificador del nodo previo que le envió el paquete.

RREP: 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 manare *unicasta* través de la trayectoria de regreso almacenada previamente en los nodos intermedios, asumiendo un comportamiento bidireccional. 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 por la cual se realizará la comunicación. En caso de que el nodo fuente reciba varios RREP, el mecanismo de selección de ruta tiene como objetivo optimizar el menor número de saltos en la trayectoria. La Figura 4 y la Figura 5 muestran el mecanismo de RREQ y RREP cuando el nodo 1 requiere enviar información al nodo 9.

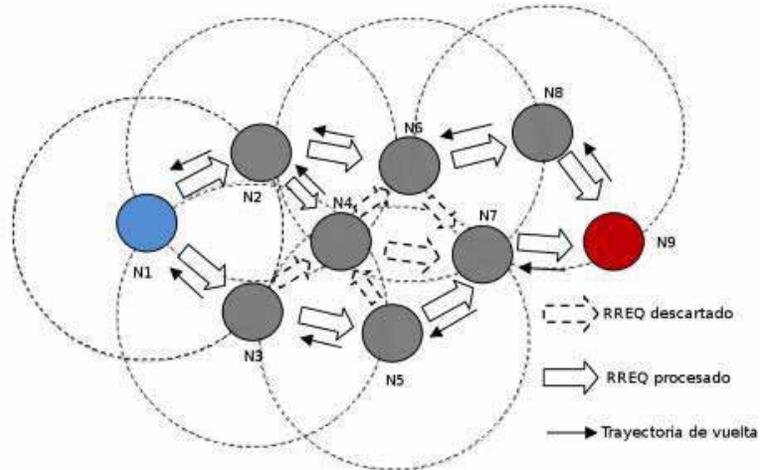


Figura 4: Mecanismo RREQ.

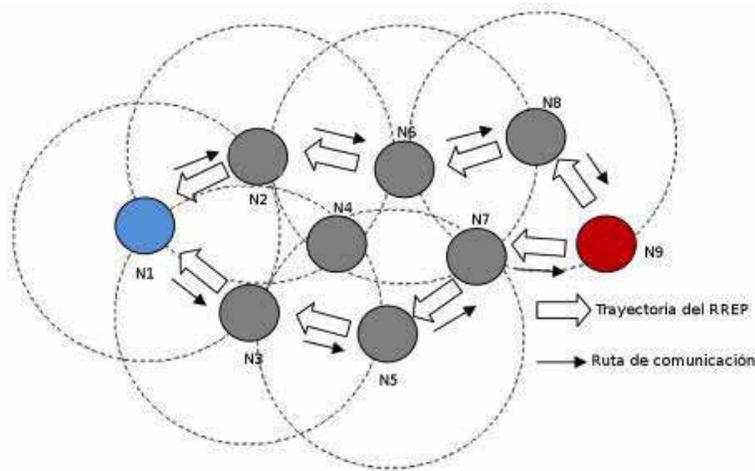


Figura 5: Mecanismo RREP.

Mantenimiento de la ruta

Como parte del mecanismo de mantenimiento de ruta el protocolo AODV utiliza dos paquetes para este fin: paquete de conectividad local y paquetes de error de ruta (*Hello* y *RERR*). Los paquetes *Hello* son utilizados para el mantenimiento de la conectividad

local de un nodo, el funcionamiento de este paquete es ser enviado periódicamente por los nodos que se encuentran en la red para indicar su presencia a los nodos vecinos. Cuando algún nodo deja de recibir estos mensajes por parte de sus vecinos, se asume que el enlace ha dejado de funcionar, a su vez este nodo envía un mensaje RERR a sus nodos vecinos a fin de dar a conocer que este enlace ya no está funcionando. Los nodos que reciben este paquete lo propagan a todos los nodos cuya trayectoria podría verse afectada, de esta forma cada nodo etiqueta como inválida esta trayectoria.

Propuesta de mejora al protocolo de enrutamiento AODV

Lo primero a atacar en las restricciones propuestas, es descartar los paquetes RREQ, de esta forma se evita la construcción de rutas inválidas en una jerarquía de iWMN. El paquete RREQ contiene mecanismos como lo es el identificador propio del nodo, el identificador del nodo previo y el identificador del nodo destino. Para evitar la construcción de rutas inválidas, cada nodo debe determinar su posición jerárquica y sus funciones dentro de la red. Como cada nodo tiene conocimiento de su propio identificador así como del identificador del nodo destino y del nodo previo, cada nodo debe ser capaz de determinar si el paquete debe ser procesado o descartado.

El algoritmo propuesto es:

Entrada: Paquete RREQ, identificadores: id_fuente, id_previo e id_destino.

```
If id_fuente = MP y id_previo = STA then  
RREQ descartado  
Else if id_fuente = STA && id_previo = STA || id_fuente = STA && id_previo = MP ||  
id_fuente = STA && id_previo = MPP then  
RREQ descartado  
Else if id_fuente = MPP && id_previo = STA then  
RREQ descartado  
Else if id_fuente = STA && id_previo = MAP && id_destino ≠ id_fuente then  
RREQ descartado  
Else  
RREQ descartado
```

Análisis y discusión de resultados

En esta sección del proyecto se presentan los resultados obtenidos a través de las simulaciones, mediante la evaluación de las medidas de desempeño propuestas.

Desafortunadamente el equipo con el que se cuenta para la realización de este proyecto es obsoleto, y no soportó las situaciones planteadas en este proyecto, razón por la cual se tuvo que recurrir a un simulador de eventos discretos. Sin embargo, el simulador no cuenta con los avances necesarios para poder simular este tipo de adecuaciones al protocolo, por lo que los resultados podrían variar fuertemente en una implementación real. Además de los problemas con el equipo, se tuvieron que realizar cambios en la

topología que permitieran al simulador crear un escenario lo más parecido a una implementación real, pues al final dentro de una simulación la naturaleza del protocolo AODV ignoró que la red fuera una iWMN.

En muchas de las ocasiones, se generaron muchas rutas no deseadas, en las que la naturaleza del protocolo prevalecía a las modificaciones a la topología, provocando que el enrutamiento se diera a través de STA's, camino que no estaba permitido.

Tasa de entrega promedio

En la figura 6 y 7, se observa la entrega promedio y la tasa de entrega promedio respectivamente. Se puede notar una tendencia variable y descendiente a medida que aumentan los paquetes enviados. En las tres diferentes redes se puede observar una cantidad de paquetes recibidos muy similar. Basados en los resultados, la tasa de entrega fue aproximadamente del 90%. La entrega de los paquetes se vio afectada por la generación de rutas no deseadas que generalmente se presentaban cuando alguno de los STA's se movió a otro MAP, provocando que el protocolo eligiera un STA para el enrutamiento. En general y considerando que la red es tcp/ip la cantidad de paquetes perdidos fue poca. Aunado a la pequeña cantidad de nodos con los que se realizó la simulación hay que considerar que la cantidad de tráfico presente era exclusivamente el tráfico con el que se estaba evaluando el protocolo de enrutamiento, lo cual podría explicar por qué la cantidad tan baja de pérdidas. Considerando una implementación real, así como tráfico de internet, la cantidad de entrega promedio debería ser aproximadamente del 50%, además la mayor cantidad de pérdidas se debe presentar en los MPP pues es ahí en donde el tráfico se concentra.

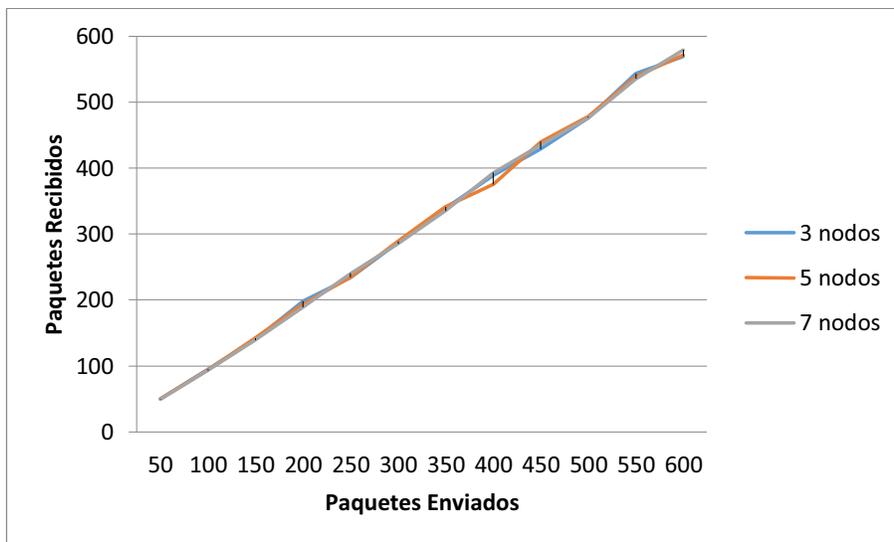


Figura 6: Entrega promedio

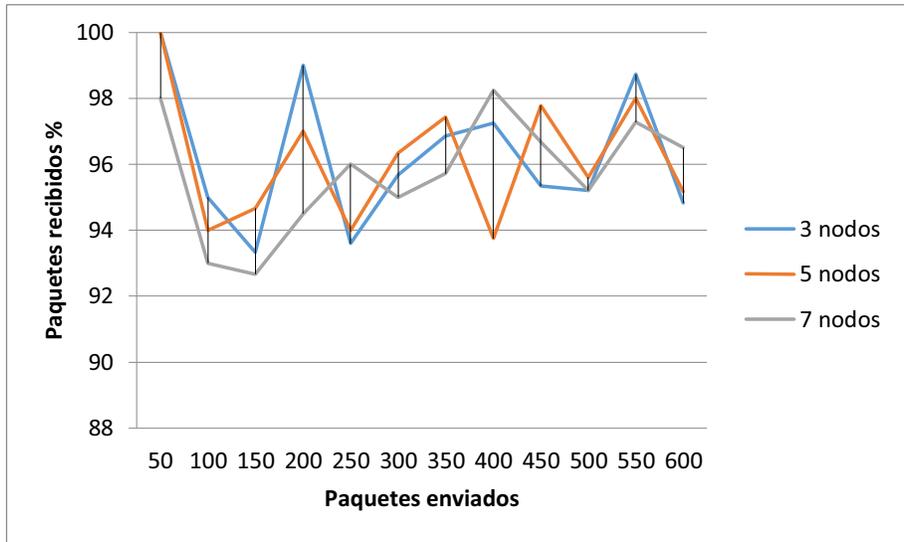


Figura 7: Tasa de entrega promedio

Latencia en el descubrimiento de la ruta

Este parámetro indica el tiempo promedio que toma el protocolo de enrutamiento para descubrir una ruta que le permita comunicarse con los nodos, esta es la ruta que el protocolo determina ser la más óptima. La latencia resultante fue considerablemente pequeña, en la mayoría de los casos fue menor a 1s. La latencia incrementó en milisegundos con el aumento de los usuarios en la red, de acuerdo a lo observado la latencia en el descubrimiento de una ruta en redes con un mayor número de usuarios debería estar alrededor de los 2s y 2.5s.

Cantidad de paquetes perdidos

En la figura 8 se muestra la cantidad de paquetes perdidos respecto a los paquetes enviados. Se puede apreciar que la tendencia aunque es variable, se mantiene creciente, a mayor cantidad de paquetes enviados, mayor cantidad de paquetes perdidos. La cantidad de paquetes que se perdieron no fue mayor al 10%, considerando que el protocolo seleccionaba rutas no deseadas, y que en el cambio de MAP, la selección de una ruta no deseada y el movimiento del tráfico a través de la troncal, la pérdida de paquetes no fue tan grande como se esperaba. La mayor parte de la pérdida de paquetes se dio en el cambio de rutas, conforme los usuarios móviles actualizaban su ubicación, durante ese proceso muchos de los nodos no lograban encontrar una ruta por lo que descartaban los paquetes. Dada la poca cantidad de tráfico en la red, los MP's no se vieron saturados, por lo que en esta región la pérdida de paquetes no fue más que la esperada en una red tcp/ip.

Considerando una red con un mayor número de usuarios y con un mayor tráfico en ella, la pérdida de paquetes debería ser mayor, y la mayoría de estas debería ocurrir dentro de la troncal de la red, y no en el descubrimiento de una nueva ruta o en rutas no deseadas.

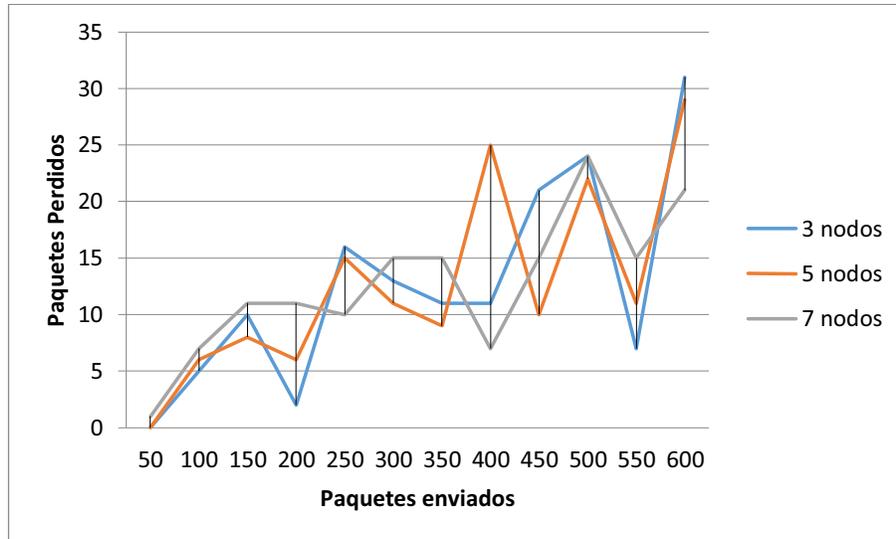


Figura 8: Cantidad de paquetes perdidos

Conclusiones

Las redes iWMN han surgido como una de las propuestas más viables para extender la conectividad de un red cableada, particularmente el internet, así como para atender la demanda de conectividad creciente. Esta arquitectura es económica y fácil de implementar y es una de las más utilizadas. En este proyecto presenté un estudio sobre las características de esta arquitectura así como una propuesta para mejorarla. Las iWMN combinan propiedades tanto de redes ad hoc como de infraestructura, por lo que heredan un conjunto de ventajas, propiedades y desventajas de estas arquitecturas.

Uno de los problemas más estudiado y que genera mayor dificultad es el estudio del enrutamiento de la información en iWMN, para el cual una de las soluciones propuestas es el utilizar como base los protocolos de enrutamiento diseñados específicamente para ad hoc, por la naturaleza de las características heredadas de esta arquitectura. Por esta razón en este proyecto se realizó un estudio acerca de este problema y una posible solución.

En este proyecto se evaluó el desempeño del protocolo de enrutamiento AODV que es representativo del esquema de enrutamiento en redes ad hoc. Se seleccionó al protocolo de enrutamiento AODV como el principal representante del enrutamiento en redes ad hoc, debido a su popularidad, gran uso en esta arquitectura y su robustez para atacar el problema descrito.

Como parte de este proyecto, se realizó el análisis del protocolo de enrutamiento AODV a fin de proponer cambios que le permitieran trabajar en una arquitectura jerárquica y con gran demanda de conectividad como lo es iWMN. Los resultados obtenidos muestran que el protocolo podría ofrecer ciertas ventajas en una implementación real, bajo ciertas condiciones en la red. El protocolo ofreció un desempeño similar al original en ciertos parámetros, dejando claro que las diferencias entre ellos han sido mínimas. La tasa de entrega promedio demuestra que la cantidad de paquetes es mínima y se encuentra dentro de los parámetros reales en redes tcp/ip. La latencia de descubrimiento de ruta resultó ser mucho más rápido de lo esperado, nuevamente en una implementación real, los valores calculados se encuentran dentro de los parámetros reales. La cantidad de paquetes perdidos fue mínima, y esta de dentro de los MPP, si consideramos el tráfico de internet aunado al tráfico de la propia red los MPP tendrán una carga de información y se podrían generar cuellos de botella, provocando una mayor cantidad de pérdida de paquetes.

AODV muestra una pequeña desventaja frente a los protocolos utilizados en este tipo de arquitecturas hoy en día, la latencia de descubrimiento de ruta. La mayor parte de los protocolos de enrutamiento utilizados en esta arquitectura tienen un tiempo muy bajo de descubrimiento de ruta, tan bajo que generalmente es considerado 0. Es una pequeña desventaja pues al final el tiempo es mayor en su descubrimiento, y este podría incrementarse conforme la red escale en tamaño, dispositivos y distancia.

Es importante considerar que la señalización utilizada en el protocolo de enrutamiento AODV es baja, pues está enfocado para trabajar con dispositivos con limitaciones energéticas lo que obliga a que las distancias entre los STAs y los MAP y MPP sea pequeña. Considerando este factor una solución a este problema podría ser un protocolo híbrido, que utilice las propuestas de investigación que se han llevado a cabo hasta la fecha sobre AODV, así como las que existan para otros protocolos de enrutamiento como lo es DSDV (*Destination sequenced Distance Vector*).

Los MAP de la red son los elementos que más sufren pérdidas de paquetes así como una gran densidad de tráfico. Para trabajos futuros es importante evaluar el desempeño y efectos que tendrá sobre la troncal de la red, las regiones de cobertura e inclusive sobre un mayor número de portales de malla, pues esta podría incrementar significativamente las prestaciones de la red. La utilización conjunta de métricas de enrutamiento que contemplan otras propiedades de la red, podría incrementar el desempeño de los protocolos de enrutamiento.

Referencias

[1]panOULU Open Wireless Internet Access, [en línea] Disponible en: <http://www.panoulu.net>, Oulu, Finlandia, 2009.

[2]510Open – East BayCommunityMesh Networks, [en línea] Disponible en: <http://510open.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, [en línea] Disponible en: <http://southampton.romanse.org.uk>, Southampton, Inglaterra, 2009.
- [5] A. Kumar, D. Manjunath y J. Kury, *The IEEE 802.11 WLAN Standards, in Wireless Networking*, Ed. Morgan Kaufmann, pp 204-211, 2008.
- [6] R. Bruno, M. Conti, *Mesh Networks: Commodity Multihop Ad hoc Networks*, IEEE Communications Magazine, Vol. 43, No. 3, pp. 123-132, Marzo 2005.
- [7] F. Akyildiz, X. Wang, *Wireless Mesh Networks: A survey*, Computer Networks and ISDN Systems, Vol. 47, No.4, pp 445-487, Marzo 2005.
- [8] F. Akyildiz, X. Wang, *A Survey on Wireless Mesh Networks*, IEEE Communications Magazine, Vol. 43, No. 9, pp 23-30, Septiembre, 2005.
- [9] F. Akyildiz, X. Wang, *Wireless Mesh Networks*, Advances Texts in Communications and Networking, Ed. Jhon Wiley and Sons, pp. 7-13, 2009.
- [10] X. Wang, A. Lim, *IEEE 802.11s wireless mesh networks: Framework and challenges*, Ad Hoc Networks Journal (Elsevier), Vol. 6, No. 6, pp. 970–984, Agosto, 2008.
- [11] G. Hiertz, D. Denteneer, S. Max, *IEEE 802.11s: The WLAN Mesh standard*, IEEE Wireless Communication, Vol. 19, No. 1, pp. 104-111, Febrero, 2010.
- [12] D. Medhi, K. Ramasamy, *Network Routing, Algorithms, Protocols and Architectures*, Ed. Morgan Kaufman Publishers, 2007.
- [13] M. Steenstrup, *Routing in Communications Networks*, Ed. Prentice Hall, pp. 84-87 y 135-138, 1995.
- [14] A. Zakrzewska, L. Koszalka, A. Kasprzak, *Analysis of Routing Protocol Performance in Wireless Mesh Networks*,