

**Centro de Investigación Científica y de
Educación Superior de Ensenada**



**MECANISMOS DE ENRUTAMIENTO PARA REDES INALÁMBRICAS DE
ÁREA LOCAL (WLAN) DE TIPO MALLA**

TESIS

MAESTRÍA EN CIENCIAS

CARLOS ALBERTO FLORES PÉREZ

ENSENADA BAJA CALIFORNIA, MÉXICO, OCTUBRE DE 2007.

TESIS DEFENDIDA POR
Carlos Alberto Flores Pérez
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



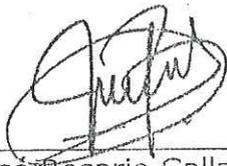
Dr. Luis Armando Villaseñor González
Director del Comité



Dr. José Antonio García Macías
Miembro del Comité



Dr. Arturo Velázquez Ventura
Miembro del Comité



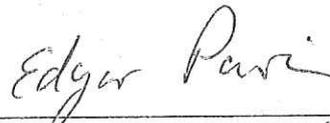
Dr. José Rosario Gallardo López
Miembro del Comité



Dr. Jaime Sánchez García
Miembro del Comité



Dr. Arturo Velázquez Ventura
*Coordinador del programa de
posgrado en Electrónica y
Telecomunicaciones*



Dr. Edgar Gerardo Pavía López
Director de Estudios de Posgrado

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**MECANISMOS DE ENRUTAMIENTO PARA REDES INALÁMBRICAS DE ÁREA
LOCAL (WLAN) DE TIPO MALLA**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

CARLOS ALBERTO FLORES PÉREZ

Ensenada, Baja California, México, 10 Octubre del 2007.

RESUMEN de la tesis que presenta **Carlos Alberto Flores Pérez**, como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES. Ensenada, Baja California. Septiembre de 2007.

MECANISMOS DE ENRUTAMIENTO PARA REDES INLÁMBRICAS DE ÁREA LOCAL (WLAN) DE TIPO MALLA

Resumen aprobado por:


Dr. Luis Armando Villaseñor González

Director de Tesis

En general, las redes inalámbricas de área local (WLAN) se clasifican en redes de infraestructura y redes inalámbricas *ad-hoc*. Por otro lado, las redes inalámbricas pueden coexistir con redes cableadas, dando como resultado topologías de red de tipo híbrido. Recientemente, ha surgido gran interés en la implementación de topologías de red inalámbricas denominadas de tipo malla. Este tipo de redes se componen de diferentes dispositivos, tal como, *Portales de Acceso a Internet*, *Puntos Malla* (i.e. enrutadores inalámbricos) y *Nodos Móviles*; todos estos dispositivos se distribuyen en un área geográfica de interés y se configuran para operar en modo *ad-hoc*. Con este tipo de topologías se pretende extender el acceso hacia redes cableadas, como la Internet, utilizando enrutadores inalámbricos, que a su vez, proporcionan conectividad a nodos móviles que requieran comunicarse ya sea dentro de la red inalámbrica o hacia la red cableada.

Una característica de las redes inalámbricas es que los nodos deben compartir el acceso al medio, de tal forma que el rendimiento de éstas es pobre cuando se tiene un gran número de nodos transmitiendo por un mismo canal; en este trabajo se propone que los nodos malla cuenten con múltiples interfaces de radio para transmitir por diferentes canales simultáneamente y así poder mejorar el rendimiento general de red. Debido a esto, resulta indispensable implementar un mecanismo de configuración de los canales que son utilizados por los nodos malla. Una vez finalizada la configuración de los canales, el protocolo de enrutamiento debe ser capaz de establecer rutas utilizando los enlaces que proporcionan los nodos malla. Por otro lado, el mecanismo de enrutamiento debe ser capaz de atender peticiones de comunicación con nodos dentro de la red inalámbrica, así como peticiones de comunicación hacia nodos que se encuentren en la red cableada. De esta forma, cuando un nodo móvil requiera comunicarse con un nodo que se encuentre en la red cableada, el mecanismo de enrutamiento deberá ser capaz de proporcionar una ruta hacia el nodo portal quién se encargará de enrutar los paquetes hacia el nodo destino en la red cableada. Por otro lado, cuando un nodo móvil requiera comunicarse con otro nodo que se encuentre en la red inalámbrica, el protocolo deberá ser capaz de proporcionar una ruta hacia el nodo destino dentro del dominio inalámbrico.

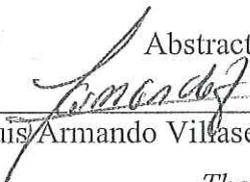
Este trabajo de tesis consiste en la adaptación del mecanismo de enrutamiento AODV para que trabaje en forma eficiente dentro de una topología de red inalámbrica de tipo malla, considerando el uso de dispositivos con múltiples interfaces. El mecanismo de enrutamiento propuesto se evalúa a través de la simulación de diferentes escenarios y se compara con una topología de red donde todos los nodos cuentan con una sola interfaz de radio.

Palabras clave: Topología inalámbrica de tipo malla, portal, puntos malla, nodos móviles, enrutamiento, múltiples interfaces de radio.

ABSTRACT of the thesis presented by **Carlos Alberto Flores Pérez** as a partial requirement to obtain the **MASTER OF SCIENCE** degree in **ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS**. Ensenada, Baja California, Mexico. September 2007.

ROUTING PROTOCOLS FOR WIRELESS LOCAL AREA MESH NETWORKS

Abstract approved by:


Dr. Luis Armando Villaseñor González

Thesis Supervisor

In general, a wireless local area network (WLAN) can be classified as a wireless infrastructure network, or as a wireless ad-hoc network. Similarly, wireless networks can coexist with wired network, thus forming hybrid network topologies. Recently, there has been great interest in the implementation of wireless mesh network topologies. This type of network topology is composed of different devices, such as, *Internet Access Gateways*, *Mesh Points* (i.e. wireless routers), and *Mobile Nodes*; these devices are distributed within a geographic area of interest and are configured to operate in an ad-hoc mode. With this type of topologies it is possible to extend the access toward wired networks, such as the Internet; as a result, mesh routers can be used to provide connectivity within the wireless network, or toward the wired network via the Internet Access Gateways.

One of the main characteristics of a wireless network is that wireless nodes must share the access to the medium, as a result, the network performance degrades significantly when a large number of nodes are using a single channel for communication; this work proposes the implementation of mesh routers equipped with multiple radio interfaces to support simultaneous transmissions by using different channels, thus improving the network performance. As a result, a mechanism must be in place to enable the proper configuration of channels to be used by the mesh routers. Once the channels have been configured, the routing protocol will be able to provide routes by using the mesh routers. However, the routing protocol must be able to provide connectivity between nodes located within the wireless network, as well as, provide connectivity toward nodes located in the wired network. Thus, communication toward the wired network must take place through the portal node; then the portal node proceeds to route the packets toward the destination node in the wired network. Similarly, when a mobile node requires communication with another node in the wireless network, the routing protocol must be able to provide a valid route to the destination within the wireless domain.

This thesis presents a proposal based on the modification of the AODV routing mechanism to provide an efficient operation in a wireless mesh network topology, while considering the use of multiple interface devices. The proposed routing mechanism is evaluated through the simulation of different scenarios and it is compared with a network topology where all the nodes are equipped with a single radio interface.

Keywords: Wireless mesh networks, gateway, mesh points, mobile nodes, routing, multiple radio interfaces.

DEDICATORIA

A mis padres,

Por su apoyo incondicional a lo largo de todos estos años, sin ustedes esto no hubiera sido posible.

A mis abuelos,

Que siempre han estado a mi lado desde el día que llegue a este mundo.

A Diana,

La mujer que amo profundamente, con quien he compartido los momentos más felices de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar las gracias a mi director de tesis Dr. Luis Armando Villaseñor González, quien desde el principio de este proyecto me ha apoyado incondicionalmente, le agradezco que haya compartido sus conocimientos.

A los miembros de mi comité, Dr. Jaime Sánchez García, Dr. José Rosario García, Dr. Arturo Velázquez Ventura y Dr. José Antonio García Macías, por todas las aportaciones y comentarios durante la realización de este trabajo.

A mis compañeros y amigos de generación: Dania, Sarai, Edna, Lennin, Richard, Beto, Daniel, Ely por su apoyo en la realización de la tesis, Mario por los asados, Ivan por mas de tres cosas, Jorge por sus correos, Aldo por ser un gran amigo, Andalon por su hospitalidad, Andres por su amistad, Marco por los tragos, Sergio por las aventuras que pasamos, Javo que siempre me recibió en el bar rojo y Varun.

A mi amigo José Luis Olvera Cervantes a quien admiro y respeto; gracias por apoyarme en los momentos difíciles durante estos dos años.

A mi amigo Jonatan Peña Ramírez (Tuzo) con quien compartí aventuras, gracias por aguantarme dos años.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, por haberme permitido ser parte de esta gran institución, de la cual me siento orgulloso

Al CONACYT por el apoyo económico recibido durante toda la maestría, sin el cual no hubiera sido posible terminar este ciclo.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
I INTRODUCCIÓN.....	1
I.1 MOTIVACIÓN.....	3
I.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
I.3 OBJETIVOS.....	6
I.4 INFRAESTRUCTURA.....	7
I.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.....	8
II REDES INALÁMBRICAS.....	10
II.1 INTRODUCCIÓN.....	10
II.2 REDES INALÁMBRICAS DE ÁREA LOCAL (WLAN).....	10
II.2.1 Redes de Infraestructura.....	10
II.2.2 Redes Móviles <i>Ad-hoc</i>	11
II.2.3 Redes Inalámbricas de Tipo Malla.....	13
II.3 CAPA FÍSICA.....	14
II.3.1 Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencia (FHSS).....	15
II.3.2 Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS).....	16
II.3.3 Multicanalización por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM).....	17
II.4 CONTROL DE ACCESO AL MEDIO.....	18
II.4.1 Acceso por contención: DCF.....	18
II.5 PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO.....	21
II.5.1 Enrutamiento Híbrido con Actualizaciones Periódicas (HRPU).....	23
II.5.2 Hyacinth.....	23
II.5.3 AODV-MR.....	24
II.6 ENRUTAMIENTO POR VECTOR DE DISTANCIA BAJO DEMANDA (AODV).....	25
II.6.1 Búsqueda por Expansión de Anillo.....	26
II.6.2 Descubrimiento de Ruta.....	26
II.6.3 Mantenimiento de ruta.....	29
II.6.4 Formato del mensaje RREQ.....	29
II.6.5 Formato del mensaje RREP.....	31
II.6.6 Formato del mensaje RERR.....	32
II.7 RESUMEN.....	33
III IMPLEMENTACIÓN DE AODV EN REDES DE TIPO MALLA.....	34
III.1 INTRODUCCIÓN.....	34
III.2 CONSIDERACIONES.....	34
III.3 CONFIGURACIÓN DE INTERFACES.....	35
III.4 PROCESO DE CONFIGURACIÓN DE INTERFACES DE NODOS MALLA A UN SALTO DEL PORTAL.....	36
III.4.1 Mensaje de configuración tipo 1 (CONF1).....	36
III.4.2 Mensaje de configuración tipo 2 (CONF2).....	38

TABLA DE CONTENIDO (Continuación)

	Página
III.4.3 Mensaje de configuración tipo 3 (CONF3)	40
III.5 PROCESO DE CONFIGURACIÓN DE INTERFACES DE NODOS MALLA A DOS O MÁS SALTOS DEL PORTAL.	42
III.6 ESCENARIO DEL NODO MALLA OCULTO	44
III.7 INTEGRACIÓN DE AODV EN REDES DE TIPO MALLA.....	49
III.8 CONECTIVIDAD A INTERNET EN REDES DE TIPO MALLA	51
III.8.1 Descubrimiento del portal.....	51
III.8.2 Comunicación entre un nodo móvil y un nodo en Internet.....	53
III.8.3 Tabla de enrutamiento	57
III.9 RESUMEN	58
IV ESCENARIOS Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN	59
IV.1 INTRODUCCIÓN	59
IV.2 SIMULADOR DE REDES NS-2	59
IV.3 MODELOS DE PROPAGACIÓN DE RADIO PARA NS-2	62
IV.3.1 Modelo de Espacio libre (Free Space).....	62
IV.3.2 Modelo de Dos Rayos (Two-Ray Ground Reflection)	62
IV.3.3 Modelo de Sombreo (Shadowing)	63
IV.3.4 Modelo de Movilidad Random Waypoint	63
IV.4 Extensiones de funcionamiento de NS-2.29	64
IV.5 MÉTRICAS PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DE LA RED	64
IV.5.1 Caudal Eficaz.....	65
IV.5.2 Retardo.....	65
IV.5.3 Pérdida de Paquetes	66
IV.5.4 Variación en el Retardo (Jitter).....	66
IV.6 PARÁMETROS GENERALES DE SIMULACIÓN.....	67
IV.6.1 Escenario 1.....	67
IV.6.1.1 Resultados de Simulación Escenario 1	70
IV.6.2 Escenarios 2 y 3	76
IV.6.2.1 Resultados de Simulación Escenario 2 y 3	79
IV.7 RESUMEN	83
V CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	84
V.1 CONCLUSIONES	84
V.2 APORTACIONES	85
V.3 TRABAJO FUTURO	87
REFERENCIAS.....	89
Anexo 1.....	93

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Topología de red inalámbrica de tipo malla.....	2
Figura 2. Red de Infraestructura	11
Figura 3. Red Inalámbrica <i>ad-hoc</i>	12
Figura 4. Arquitectura de Red Inalámbrica de Tipo Malla.....	14
Figura 5. Gráfica de Transmisión con Salto en Frecuencia.....	16
Figura 6. Gráfica para DSSS.....	16
Figura 7. a) Técnica multiportadora original; b) Modulación de portadoras ortogonales (OFDM)	17
Figura 8. Problema del Nodo Oculto	20
Figura 9. Problema del Nodo Expuesto	20
Figura 10. Principales Protocolos de Enrutamiento.....	22
Figura 11. Diagrama de Flujo de la Búsqueda Global en la Red.....	28
Figura 12. Formato del mensaje RREQ del protocolo AODV	29
Figura 13. Formato del mensaje RREP del protocolo AODV.....	31
Figura 14. Formato del mensaje RERR del protocolo AODV	32
Figura 15. Inicio del proceso de configuración	37
Figura 16. Elección de un canal Común para establecer comunicación entre un nodo malla y el portal	38
Figura 17. Respuesta del nodo malla hacia el portal	39
Figura 18. Incremento del contador de canal.....	40
Figura 19. Respuesta del portal hacia el nodo malla, informando que la configuración fue correcta.....	41
Figura 20. Incremento del contador del canal 1 en el nodo malla.....	42
Figura 21. Cambio de interfaz para continuar el proceso de configuración.....	43
Figura 22. Segundo nodo malla configurado.....	44
Figura 23. Escenario del nodo malla oculto	45
Figura 24. Los nodos malla elijen canales diferentes para comunicarse con el portal	46
Figura 25. El nodo portal recibe el mensaje CONF2 del nodo malla 1	47
Figura 26. El portal recibe en mensaje CONF2 con parámetros no validos.....	48
Figura 27. EL Portal Difunde un Nuevo Mensaje CONF1.....	49
Figura 28. Formato extendido del mensaje RREQ.....	50
Figura 29. Formato Extendido del mensaje RREP	50
Figura 30. El nodo A, en busca de una ruta hacia B.....	53
Figura 31. El nodo B, responde a la solicitud de A	54
Figura 32. El nodo A, busca la ruta hacia el nodo B	56
Figura 33. El nodo portal responde con un RREP_E, a la solicitud de A	57
Figura 34. Simulador de red NS-2.....	61
Figura 35. Visualizador Grafico NAM.....	61
Figura 36. Escenario 1 NAM.....	68

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

	Página
Figura 37. Escenario 1	69
Figura 38. a) Caudal Eficaz interfaces múltiples, b) Caudal Eficaz una interfaz	71
Figura 39. a) % Pérdida de Paquetes Interfaces Múltiples, b) % Pérdida de Paquetes Una Interfaz	72
Figura 40. a) Retardo Interfaces Múltiples, b) Retardo Una Interfaz	73
Figura 41. a) Jitter Interfaces Múltiples, b) Jitter Una Interfaz	74
Figura 42. Escenario 2 con 4 nodos malla con un área de cobertura de 500 x 500 mts.	77
Figura 43. Escenario 3 con 6 nodos malla con un área de cobertura de 800 x 500 metros. .	77
Figura 44. a) Caudal Eficaz escenario 2, b) Caudal Eficaz escenario 3	80
Figura 45. a) Pérdida de paquetes escenario 2, b) Pérdida de Paquetes escenario 3	81
Figura 46. a) Retardo escenario 2, b) Retardo escenario 3	82
Figura 47. a) Jitter escenario 2, b) Jitter escenario 3	83

LISTA DE TABLAS

Tabla I. Principales Características de Capa Física de 802.11	15
Tabla II. Parámetros de Simulación Escenario 1	70
Tabla III. Comparación del Escenario 1 con el nodo móvil a seis saltos del portal	75
Tabla IV. Parámetros de los Escenarios 2 y 3.	78

I INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los usuarios de diferentes sistemas de comunicaciones electrónicos, principalmente Internet, han crecido a un ritmo vertiginoso [Zakon, 2006]. Esto se debe a la gran investigación en el desarrollo de tecnologías que permitan tener cada día mejor calidad, tanto en los dispositivos electrónicos como en las aplicaciones que se ofrecen al usuario final, además de la tendencia de unificar todos los sistemas de comunicaciones a través de Internet.

En general, las redes inalámbricas de área local (WLAN) se clasifican en redes de infraestructura y redes móviles *ad-hoc*. Las redes de infraestructura se basan en una topología que implementa el uso de un dispositivo de coordinación central denominado punto de acceso (AP) para proporcionar conectividad a los nodos inalámbricos; por otro lado, las redes *ad-hoc* son una colección de nodos móviles autónomos que se comunican entre sí, donde no existe una infraestructura de red fija y la administración se realiza de forma descentralizada.

Recientemente, ha surgido gran interés en la implementación de arquitecturas de red inalámbricas a través de la interconexión de enrutadores inalámbricos que permitan

extender el área de cobertura, proporcionando conectividad a nodos móviles que requieran comunicarse ya sea dentro de la red inalámbrica o hacia Internet. También se pretende mejorar el rendimiento general de la red debido a que los enrutadores inalámbricos cuentan con mayores recursos físicos. A este tipo de redes se les denomina de tipo malla y se componen de dispositivos llamados: Portales, Puntos Malla, así como de nodos móviles, todos estos dispositivos distribuidos en un área geográfica y operando en modo *ad-hoc*. En la fig. 1 se muestra una topología de red de tipo malla.

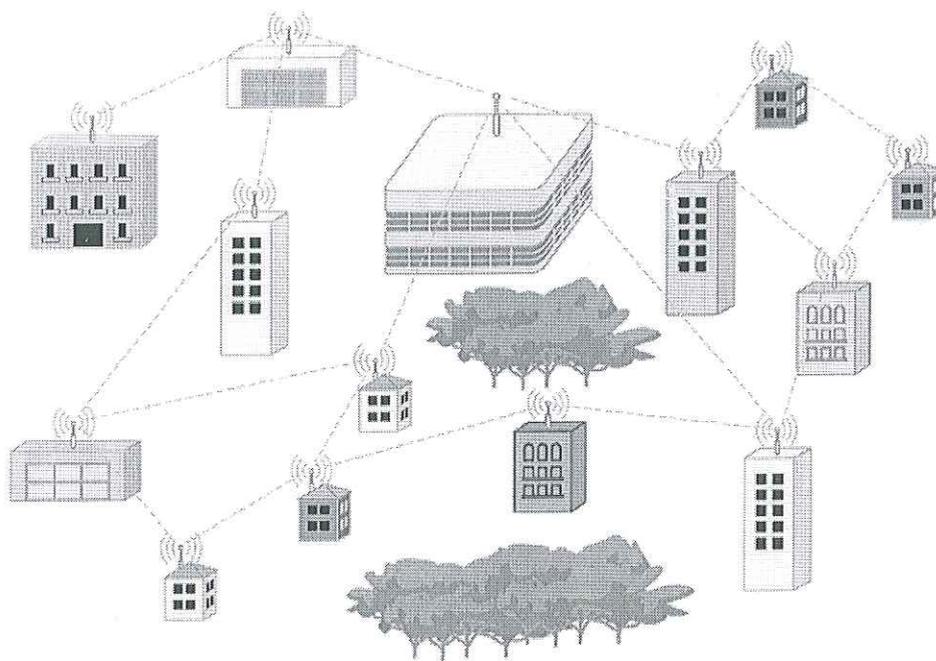


Figura 1. Topología de red inalámbrica de tipo malla

La implementación de una red inalámbrica de tipo malla introduce nuevos retos, como lo son despliegue de enrutadores de acceso interconectados a través de enlaces

inalámbricos, mecanismos para la conformación de topologías, protocolos de enrutamiento, mecanismos para proporcionar seguridad, balanceo de carga, calidad de servicio, entre otros [Faccini et al., 2005].

I.1 MOTIVACIÓN

Como se ha mencionado, existen redes inalámbricas que se basan en una topología que implementa el uso de un dispositivo denominado punto de acceso el cual opera en modo infraestructura; hoy en día es muy común encontrar un enrutador inalámbrico (AR) que incluye la funcionalidad de un AP, este dispositivo proporciona conectividad a los nodos inalámbricos dentro de una red inalámbrica de área local (i.e. WLAN) de infraestructura.

Actualmente, la comunidad científica trabaja en la creación de diferentes arquitecturas de redes inalámbricas, dentro de las cuales encontramos las denominadas de tipo malla; este tipo de redes permite extender el acceso a Internet a otros enrutadores inalámbricos. En la literatura, existen propuestas para redes inalámbricas trabajando en modo *ad-hoc*, donde se implementan mecanismos para el descubrimiento de un portal de acceso que permite la conectividad hacia la red cableada [Cha et al., 2003; Hamidian, 2003; Jelger et al., 2003; Wakikawa et al., 2002; So y Vaidya, 2006].

Además, se trabaja en lograr que los protocolos de enrutamiento soporten la utilización de enrutadores inalámbricos trabajando en modo *ad-hoc*, para así extender el área de cobertura de la red [Hamed y Wong, 2006]. En este trabajo se propone una topología de red inalámbrica de tipo malla donde se requiere la interoperabilidad entre los diferentes dispositivos que componen la red, como lo es el uso de enrutadores inalámbricos con interfaces múltiples de radio; por lo tanto, es necesaria la creación de un mecanismo que permita la configuración de estos nodos de una forma eficiente para evitar la contienda por el acceso al medio entre nodos adyacentes. De esta manera, se pretende mejorar el rendimiento de la red así como extender el área de cobertura.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente existe una gran demanda por el uso de redes de comunicaciones inalámbricas; de igual forma se presenta una gran reducción del costo de los dispositivos inalámbricos. Todo esto ha traído como consecuencia una gran aceptación de la tecnología WLAN, en especial de dispositivos trabajando bajo el estándar IEEE 802.11¹, y actualmente es muy común encontrar un enrutador inalámbrico en hogares y oficinas. Este trabajo considera un escenario hipotético en el que se propone la implementación de una topología de red inalámbrica de tipo malla con enrutadores equipados con más de una interfaz de red operando en modo *ad-hoc*. Adicionalmente, se considera que los usuarios utilizan dispositivos con una sola interfaz inalámbrica operando en modo *ad-hoc*.

¹ Estándar desarrollado por el Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, describe las normas a seguir por cualquier fabricante de dispositivos inalámbricos.

Debido a que la topología de red cuenta con nodos que tienen varias interfaces de radio, es necesario un proceso de configuración de los nodos que están equipados con interfaces múltiples. Estos nodos formarán la dorsal de la red inalámbrica de tipo malla; por otro lado, es necesario hacer posible que los nodos que forman la red malla mantengan la compatibilidad con los nodos de una sola interfaz. También se requiere definir un nodo especializado para que éste proporcione el servicio de portal de acceso hacia la red cableada.

Una vez configurada la arquitectura, se procede a la implementación de un protocolo que se encargue de buscar rutas entre nodos que requieran establecer comunicación, de manera que cuando un nodo de la red malla requiera comunicarse con un nodo que se encuentre en la red cableada, éste debe de ser capaz de encontrar al nodo portal que le permitirá tener acceso al nodo destino. Por otro lado, cuando un nodo en la red inalámbrica desea comunicarse con otro nodo que se encuentra dentro de la red inalámbrica, el protocolo debe ser capaz de encontrar el nodo correspondiente en el dominio inalámbrico.

Ya que el protocolo AODV² es uno de los protocolos más estudiados para redes inalámbricas *ad-hoc*, se tiene una gran información sobre su funcionamiento y su desempeño; sin embargo, éste no soporta el uso de nodos con interfaces múltiples para su

² AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) es un protocolo de enrutamiento para redes inalámbricas *ad-hoc* que se utiliza en este trabajo de tesis, en la sección II.6 se abordará este tema detalladamente.

uso en una arquitectura de tipo malla. Por lo tanto, se requiere de la creación de nuevos mensajes para la configuración de estos nodos con interfaces múltiples, así como adaptar el protocolo para que tenga un desempeño adecuado, dentro de una topología de red inalámbrica de tipo malla.

I.3 OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo de tesis consiste en la integración del mecanismo de enrutamiento AODV en una topología de redes inalámbricas de tipo malla, considerando el uso de dispositivos con interfaces múltiples. Los nodos inalámbricos que hacen uso de la topología de red en malla deben ser capaces de comunicarse con otros nodos que también se encuentran dentro de la red inalámbrica, así como con nodos localizados en la red cableada (i.e. Internet).

Como objetivos particulares se definen:

- Crear un mecanismo que permita configurar las interfaces múltiples de los nodos malla, para extender el área de cobertura de la red.
- Realizar la extensión de funcionalidad del protocolo AODV, para que pueda operar sobre una arquitectura de red inalámbrica de tipo malla.

- Los nodos móviles dentro de la red inalámbrica deberán ser capaces de identificar al nodo portal para lograr el enrutamiento de paquetes dentro del dominio inalámbrico hacia la red cableada.
- Un nodo inalámbrico *ad-hoc*, deberá ser capaz de comunicarse con otro nodo dentro de la red inalámbrica.

I.4 INFRAESTRUCTURA

Para el desarrollo de este trabajo de tesis se contó con el apoyo de la infraestructura proporcionada por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, la cual consiste en:

- 1 Computadora portátil Toshiba, procesador Centrino a 1.73 GHz, 512 MB de RAM y 80 GB de disco duro, corriendo el emulador de Linux CYGWIN, bajo el sistema operativo Windows.
- 2 Conexión a Internet.
- 3 Bibliotecas UNAM y CICESE.
- 4 Software de simulación Network Simulator 2 (NS-2).
- 5 Programas de Aplicación: Matlab 7, Office 2003, Adobe Acrobat, Mozilla Firefox.

I.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

En este primer capítulo se describió en forma general el problema que se pretende resolver con este trabajo de tesis, el planteamiento de los objetivos, la motivación y la organización del trabajo.

El capítulo II presenta las principales arquitecturas de redes inalámbricas, las diferentes capas físicas, cómo se realiza el acceso al medio inalámbrico así como de los principales protocolos de enrutamiento para este tipo de redes, haciendo una descripción detallada del protocolo AODV.

En el capítulo III se discute el mecanismo utilizado para la configuración de los nodos malla, además se expone el trabajo realizado para lograr la integración del protocolo de enrutamiento AODV dentro de una arquitectura de tipo malla describiendo el funcionamiento del protocolo.

En el capítulo IV se discuten los temas relacionados con el simulador utilizado en este trabajo, para después analizar los resultados obtenidos luego de simular diferentes escenarios con la arquitectura propuesta.

Por último, en el capítulo V se presentan las conclusiones y aportaciones que se obtuvieron de este trabajo, además del trabajo futuro que se recomienda realizar sobre este tema.

II REDES INALÁMBRICAS

II.1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las redes de área local inalámbricas (WLAN) trabajando bajo el estándar 802.11, han ganado mucha popularidad, que se ve acrecentada conforme sus prestaciones aumentan y se descubren nuevas aplicaciones para ellas, este tipo de redes permiten a los usuarios acceder a información y recursos en tiempo real sin estar conectados a través de cables a un determinado lugar.

II.2 REDES INALÁMBRICAS DE ÁREA LOCAL (WLAN)

A continuación se describen las principales tipos de redes WLAN y sus características.

II.2.1 Redes de Infraestructura

Este tipo de redes se distinguen por hacer uso de un punto de acceso, que se encarga de proporcionar conexión entre nodos móviles dentro de la red inalámbrica o hacia Internet. De esta manera, siempre se requieren de al menos dos saltos para establecer comunicación

entre dos nodos. Una de las principales ventajas de este tipo de redes es reducir la complejidad de los nodos móviles dado que las estaciones no necesitan mantener información de los nodos vecinos. Por otro lado, la principal desventaja de una red inalámbrica de infraestructura es que se requiere que todos los nodos estén dentro del área de cobertura del punto de acceso. En la figura 2 se muestra la topología de una red de infraestructura.

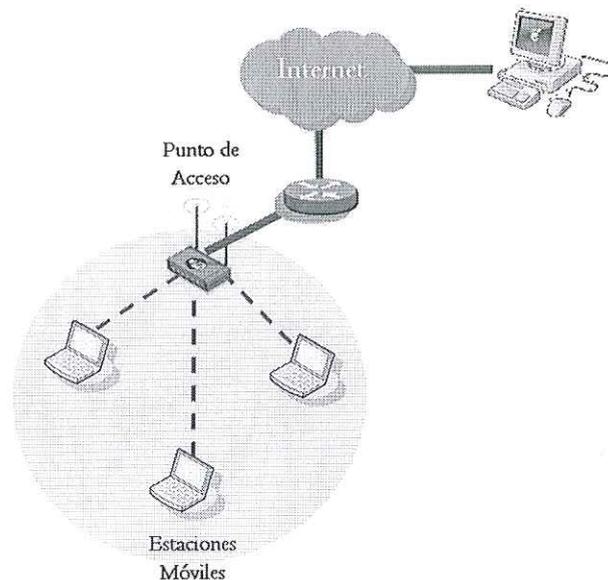


Figura 2. Red de Infraestructura

II.2.2 Redes Móviles *Ad-hoc*

Una red móvil *ad-hoc* (mobile ad-hoc network o *manet*) se compone de un conjunto de nodos móviles donde no existe un punto de coordinación central (i.e. un punto de acceso), por lo tanto no se necesita de ningún tipo de infraestructura previamente

desplegada; este tipo de redes puede surgir de forma espontánea. Las comunicaciones inalámbricas dentro de la red *ad-hoc* pueden realizarse de forma directa o a través de varios saltos, esto dependerá del alcance de transmisión en el que el receptor es capaz de recibir e interpretar correctamente la señal que envió el emisor. Si el receptor se encuentra fuera del alcance de transmisión (i.e. cobertura de la señal de radio) del nodo fuente, no podrá interpretar adecuadamente los paquetes destinados a él; pero debido a que en las redes *ad-hoc* todos los nodos pueden colaborar en el envío de paquetes, el destino puede ser alcanzado salto a salto a través de los nodos vecinos. En la figura 3 se muestra la topología de red *ad-hoc*.

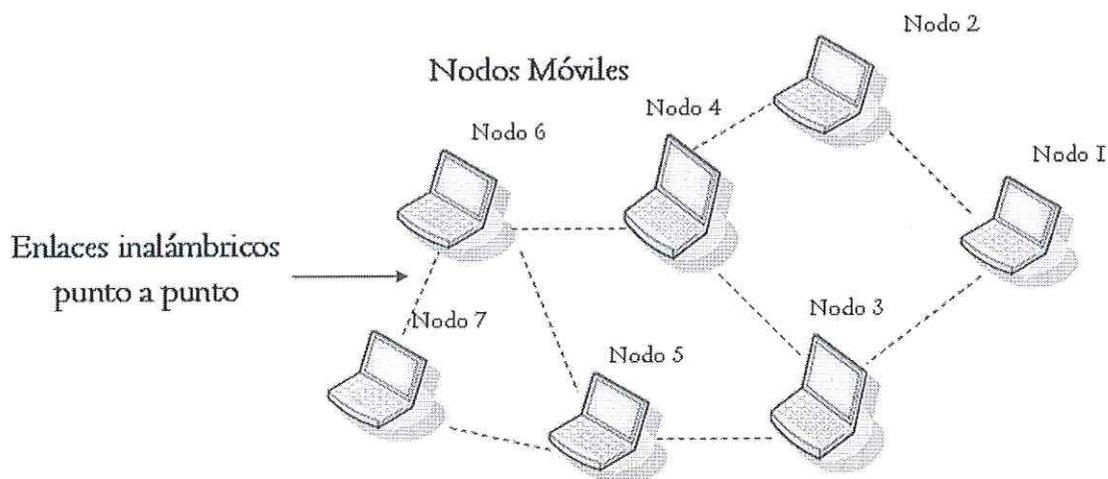


Figura 3. Red Inalámbrica *ad-hoc*

II.2.3 Redes Inalámbricas de Tipo Malla

Las redes inalámbricas de tipo malla son una extensión de las redes *ad-hoc*, éstas se componen de nodos malla, estaciones móviles y portales de acceso hacia la red cableada. Los nodos malla forman la dorsal de la red inalámbrica, generalmente tienen poca o nula movilidad. Por otro lado, las estaciones pueden ser móviles o estáticas. Este tipo de redes se organizan y se configuran de manera autónoma. Estas características aportan grandes ventajas como robustez, confiabilidad y un fácil mantenimiento. Uno de los principales objetivos de este tipo de redes es extender el área de cobertura, sin sacrificar la capacidad de canal, por esta razón los nodos malla están normalmente equipados con interfaces múltiples, las cuales pueden ser incluso de diferentes tecnologías de acceso inalámbrico. En la literatura existen varias propuestas de redes de tipo malla, [Pirzada et al., 2006; Raniwala y Chiueh, 2005; Ramachandran et al., 2005].

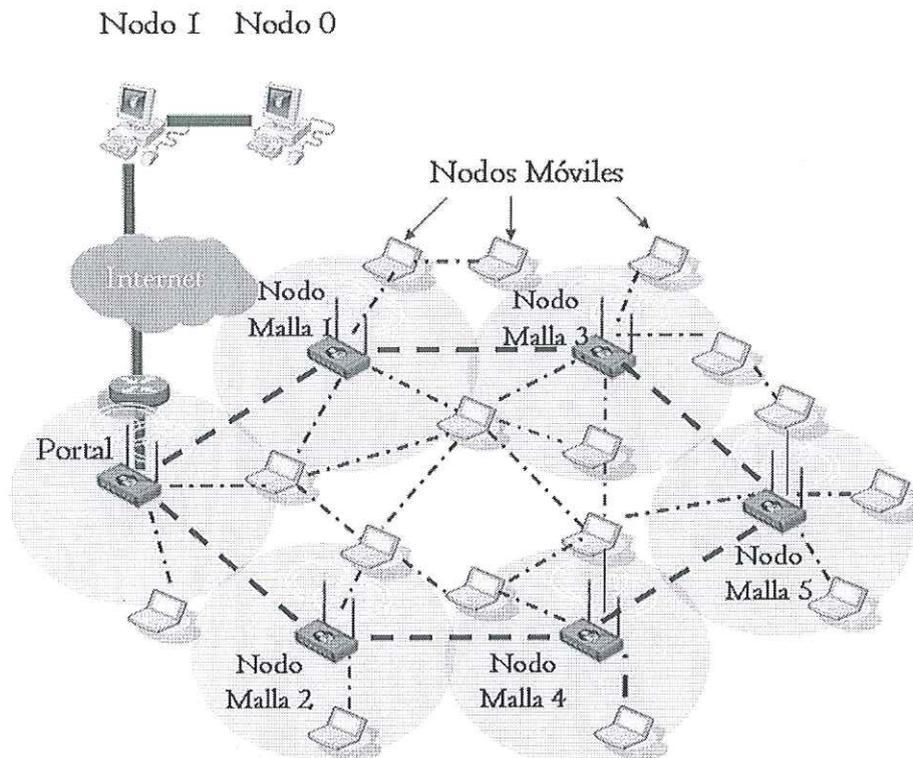


Figura 4. Arquitectura de Red Inalámbrica de Tipo Malla.

II.3 CAPA FÍSICA

La capa física de cualquier red define la modulación y la señalización características de la transmisión de datos. El estándar IEEE 802.11 define tres opciones de capa física: Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencia (FHSS), Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS), Multicanalización por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM). En la tabla 1 se presenta una comparación entre diferentes versiones del estándar 802.11.

Tabla I. Principales Características de Capa Física de 802.11

Comparación de capa física entre las tecnologías WLANs				
Características	802.11	802.11b	802.11a	802.11g
Frecuencia de operación	2.4 GHz.	2.4 GHz.	5 GHz	2.4 GHz.
Máxima tasa de transmisión	2 Mbps	11 Mbps	54 Mbps	54 Mbps
Tipo de transmisión	FHSS o DSSS	DSSS	OFDM	DSSS y OFDM

II.3.1 Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencia (FHSS)

La tecnología FHSS consiste en transmitir una parte de la información en una determinada frecuencia durante un intervalo de tiempo, pasado este tiempo se cambia la frecuencia de emisión. De esta manera, cada parte de la información se va transmitiendo en una frecuencia distinta durante un intervalo de tiempo muy corto. El orden de los saltos de frecuencia se determina según una secuencia pseudo-aleatoria almacenada en tablas, que tanto el emisor como el receptor deben conocer; en la figura 5 se muestra un ejemplo de este tipo de transmisión [Gast, 2002].

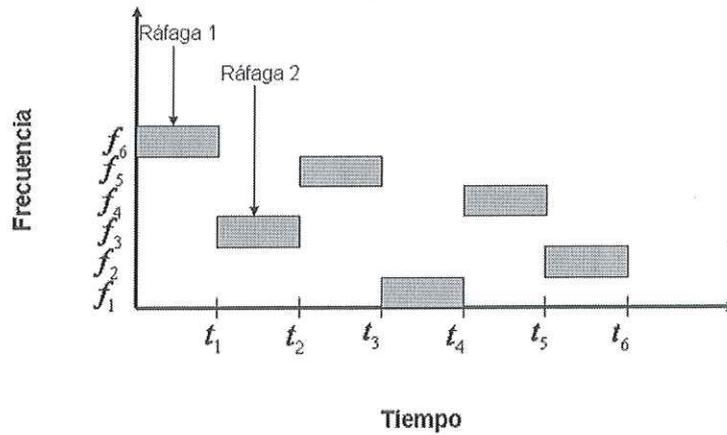


Figura 5. Gráfica de Transmisión con Salto en Frecuencia

II.3.2 Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS)

DSSS es una tecnología de capa física que genera un patrón de bits redundante llamado señal de chip para cada uno de los bits que componen la señal, cuanto mayor sea esta señal de chip, mayor será la resistencia de la señal a las interferencias. En recepción, es necesario realizar el proceso inverso para obtener la información original [Gast, 2002] como se muestra en la figura 6

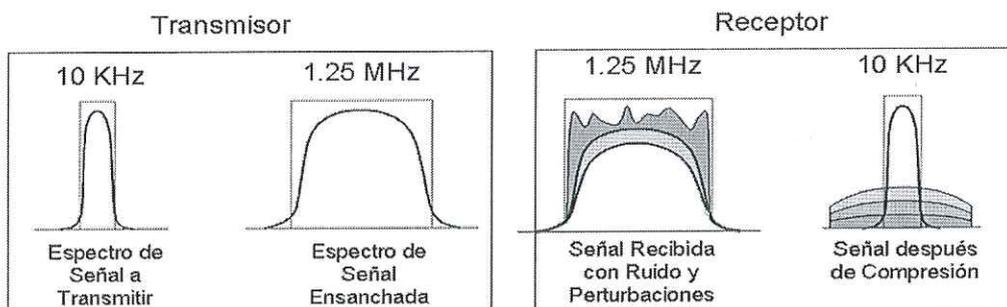


Figura 6. Gráfica para DSSS

II.3.3 Multicanalización por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM)

OFDM es una tecnología de modulación digital que divide el espectro disponible en múltiples portadoras, las cuales pueden estar traslapadas, haciendo que todas las portadoras sean ortogonales unas con otras. Proporcionando así una elevada eficiencia espectral. En la figura 7(a) podemos observar las multiportadoras, mientras que en la figura 7 (b) observamos las multiportadoras ortogonales (OFDM), con lo cual se ahorra ancho de banda [Gast, 2002].

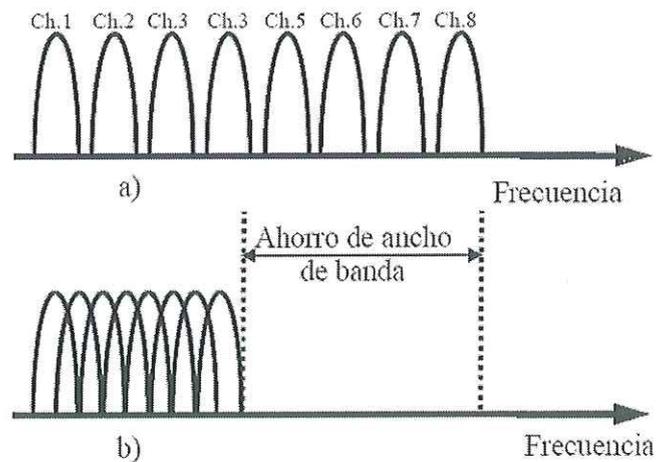


Figura 7. a) Técnica multiportadora original; b) Modulación de portadoras ortogonales (OFDM)

II.4 CONTROL DE ACCESO AL MEDIO

Una de las principales características de las redes inalámbricas es el hecho de que los nodos utilizan un medio compartido, por lo tanto, es necesario que los distintos nodos se pongan de acuerdo para no interferir en las comunicaciones de los demás.

El estándar IEEE 802.11 define dos métodos para acceder al medio: acceso por contención y acceso libre de contienda. El acceso por contención es controlado por una función de coordinación distribuida (DCF, *Distributed Coordination Function*), la DCF es obligatoria y se encuentra distribuida en todas las estaciones móviles. El acceso libre de contienda es controlado por una función de coordinación puntual (PCF, *Point Coordination Function*), la PCF es opcional y necesita de un coordinador puntual, por lo tanto, su uso se restringe solo a redes de infraestructura[Gast, 2002].

II.4.1 Acceso por contención: DCF

El acceso por contención utiliza el método llamado Acceso múltiple por censado de portadora con evasión de colisiones CSMA/CA, el cual funciona de la siguiente forma:

Cuando un nodo tiene que transmitir, primero escucha el canal para determinar si hay algún otro nodo transmitiendo, si el canal está libre, espera a que siga desocupado por

un cierto tiempo llamado DIFS (*Inter Frame Space*), y comienza a transmitir. Si el medio está ocupado o se ocupa antes de que transcurra el tiempo DIFS, el nodo realiza un algoritmo de retracción, en el cual, el nodo espera un tiempo aleatorio entre cero y una ventana de contención (CW, *Contention Window*) llamado BI (Back-off Interval). Si el medio continúa libre al finalizar este período, la estación transmite la trama; el receptor deberá de enviar un ACK (Acuse de recibo positivo) en un tiempo SIFS (*Short Inter frame Space*) que, al ser más corto que un DIFS, permite que el ACK sea el primer paquete que se envía después de una trama facilitando así que no se produzcan colisiones. El nodo espera un tiempo ACKTimeout para la recepción del ACK; si transcurre este tiempo y el ACK no llega, el nodo duplica el valor de CW y vuelve a ejecutar el algoritmo de retracción.

Existen dos problemas típicos de los esquemas basados en CSMA/CA:

El problema del nodo oculto es el fenómeno producido cuando un nodo quiere transmitir a otro que puede estar en el rango de cobertura de otros nodos, que el primero no puede escuchar. En la figura 8, podemos observar cómo el nodo A transmite hacia B; como C no se encuentra en el rango de transmisión de A no detecta ninguna comunicación en curso y puede transmitir también hacia B, provocando una colisión.

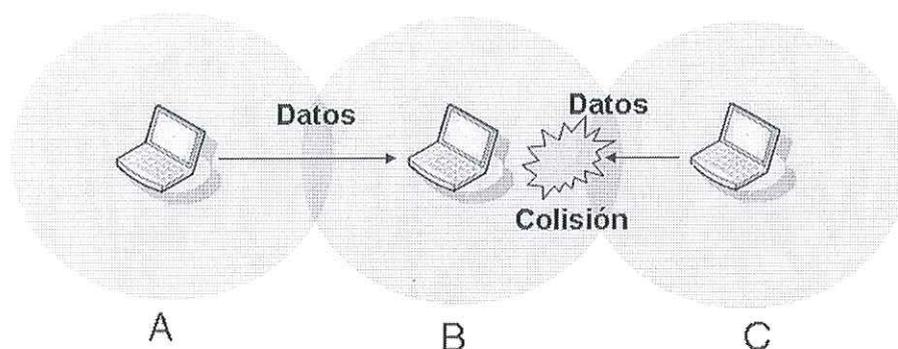


Figura 8. Problema del Nodo Oculto

El problema del nodo expuesto ocurre cuando un nodo que quiere transmitir escucha que el medio está ocupado, cuando el nodo receptor no lo está. En la figura 9, podemos observar cómo el nodo C transmite hacia D y B quiere hacer lo mismo hacia A. Pero como B escucha el medio ocupado, no inicia la transmisión, incluso cuando podría hacerlo [Gast, 2002].

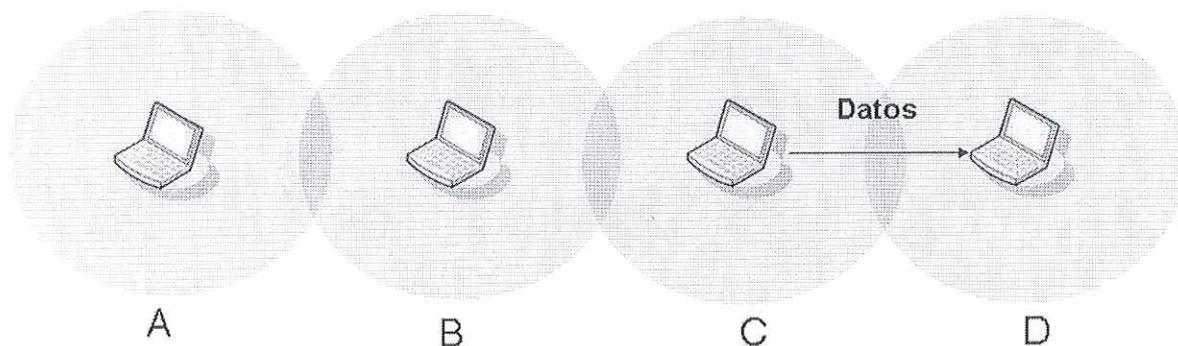


Figura 9. Problema del Nodo Expuesto

II.5 PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO

El objetivo fundamental de un mecanismo de enrutamiento es la búsqueda y establecimiento de una ruta entre un par de nodos que requieran intercambiar información. Podemos clasificar los diferentes protocolos de enrutamiento *ad-hoc* según varios criterios, pero fundamentalmente los distinguimos como protocolos proactivos, reactivos e híbridos [Mohapatra y Krishnamurthy, 2005].

Los protocolos proactivos requieren que los nodos de la red *ad-hoc* intercambien periódicamente mensajes de control; de esta manera, se busca que las rutas se mantengan continuamente actualizadas, esto trae como ventaja que los nodos reaccionen rápidamente a los cambios en la topología. Cuanto más frecuente sea el intercambio de mensajes de control, se contará con rutas más actuales y por lo tanto más confiables, pero también se incurrirá en una mayor sobrecarga por parte del protocolo, lo cual restará ancho de banda al tráfico de aplicación.

La principal limitación de las redes *ad-hoc* es el ancho de banda disponible, así, surgen los protocolos de enrutamiento reactivos o bajo demanda para reducir la sobrecarga debida a los mensajes de control. Este tipo de protocolos no intercambian información periódicamente y sólo mantienen rutas con los destinos con los cuales tienen comunicaciones activas, minimizando el número de mensajes de control. Cuando un nodo

necesita comunicarse con otro de la red *ad-hoc*, inicia un proceso que se conoce como descubrimiento de ruta y consiste en difundir un mensaje de control solicitando la ruta hacia un destino, en espera de una respuesta que incluya dicha ruta. El principal inconveniente de este tipo de protocolos es el retardo en el descubrimiento de rutas para iniciar la comunicación, además de reaccionar con menos celeridad ante cambios en la topología; en la figura 10 se muestran los principales protocolos de enrutamiento para redes inalámbricas *ad-hoc*.

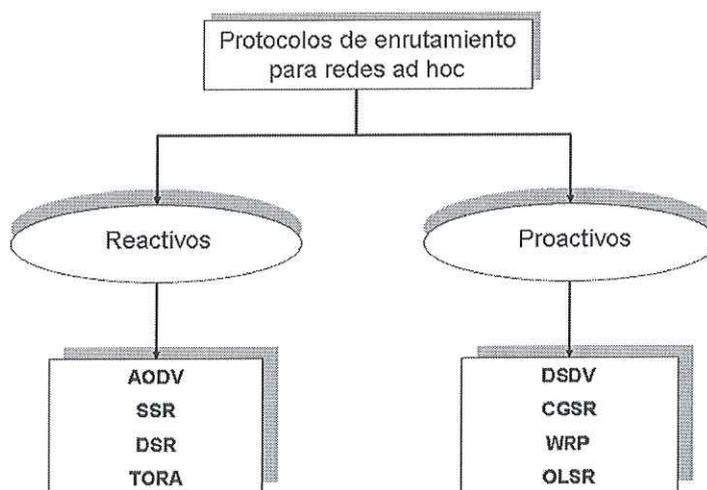


Figura 10. Principales Protocolos de Enrutamiento

Pueden utilizarse otras alternativas, tal es el caso de protocolos de enrutamiento híbridos, cuyo comportamiento puede ser modificado dinámicamente al monitorear cambios en los parámetros de la red, permitiendo el uso de protocolos proactivos en redes

pequeñas con poca movilidad y adoptar protocolos reactivos cuando la red crece en tamaño y movilidad [Toh, 2002].

En el estado del arte existen diferentes protocolos de enrutamiento propuestos para implementarse dentro de topologías de red inalámbrica de tipo malla, mencionaremos los más parecidos a nuestra propuesta, dentro de los cuales encontramos:

II.5.1 Enrutamiento Híbrido con Actualizaciones Periódicas (HRPU)

HRPU esta basado en AODV pero integra un componente proactivo al protocolo, el cual asegura que la ruta hacia el portal siempre exista en los nodos móviles. Este esquema es de tipo proactivo ya que el portal difunde periódicamente un nuevo mensaje llamado “MESH UPDATE” el cual lleva la información necesaria para alcanzar al nodo de acceso a la red cableada (i.e. Internet). En esta propuesta no se considera el uso de nodos equipados con interfaces múltiples [Damle et al., 2006].

II.5.2 Hyacinth

Hyacinth es una arquitectura para redes inalámbricas de tipo malla que emplea múltiples canales de radio simultáneamente, equipando a cada nodo malla con dos *NICs* (Network Interface Card). Además, cada nodo malla de la red está equipado con un

dispositivo de agregación de tráfico similar a un enrutador de acceso, el cual interactúa con las estaciones móviles que cuentan con una sola interfaz de radio. La asignación de canales se realiza mediante el intercambio de los siguientes mensajes de configuración, ADVERTISE/JOIN/ACCEPT/LEAVE/HELLO/RT_ADD/RT_DEL. Una vez configuradas las interfaces, se utiliza algún protocolo de enrutamiento para que los nodos puedan establecer comunicación dentro de la red inalámbrica. Con respecto a la arquitectura Hyacinth, ésta no es muy clara en cómo se realiza la comunicación con la red cableada.

En esta arquitectura, se utilizan nodos con interfaces múltiples, pero el proceso de configuración involucra el envío de varios mensajes de control que generan sobrecarga en la red. Y no especifica el uso de un protocolo de enrutamiento en particular [Raniwala y Chiueh, 2005].

II.5.3 AODV-MR

AODV-MR es una extensión del protocolo AODV, donde todos los nodos tienen el mismo número de interfaces con una idéntica asignación de canales; cuando se requiere conocer una ruta, ésta se solicita enviando un mensaje de búsqueda a través de todas las interfaces disponibles. La principal característica de AODV-MR es la de agregar un campo en los mensajes de control para identificar la interfaz por la cual se está transmitiendo el

mensaje, esta información permite crear correctamente las rutas para establecer comunicación entre dos nodos que así lo requieran [Pirzada et al., 2006].

A continuación, se describe detalladamente del protocolo de enrutamiento AODV, ya que, se utilizará a lo largo de este trabajo.

II.6 ENRUTAMIENTO POR VECTOR DE DISTANCIA BAJO DEMANDA (AODV)

AODV es un protocolo bajo demanda, es decir, el descubrimiento de rutas se lleva a cabo sólo cuando un nodo requiere comunicarse con otro y no se conoce la ruta hacia el destino. Este protocolo se basa en enrutamiento por vector de distancia, que evita la formación de bucles y el problema de conteo a infinito³ gracias a la utilización de números de secuencia que se incluyen en los encabezados de los paquetes de control [Perkins y Belding, 2003]. Sólo mantiene rutas hacia los nodos con los que tiene comunicaciones activas, lo que genera poca sobrecarga en la red. Las tablas de enrutamiento mantienen un tiempo de vida para cada enlace, si éste expira, se debe de reiniciar la búsqueda del destino. AODV utiliza la técnica de Búsqueda por Expansión de Anillo (*Expanding-Ring Search*) que describiremos a continuación.

³ El problema de conteo a infinito, ocasiona que el costo o la distancia para alcanzar un destino se incremente indefinidamente.

II.6.1 Búsqueda por Expansión de Anillo

Esta técnica tiene utilidad cuando se quiere descubrir “algo” que no se sabe dónde está pero se tiene cierta esperanza de que se encuentre cerca. Se inicia con la difusión de un mensaje, el cual indica lo que se está buscando, pero se limita la zona de rastreo. Si no hay respuesta, se amplía un poco la zona de exploración y se repite el proceso, hasta que se recibe una respuesta por parte del destino o se asume que éste no es alcanzable.

II.6.2 Descubrimiento de Ruta

Cuando un nodo de la red *ad-hoc* desea comunicarse con otro, inicia con la difusión del mensaje RREQ (Route Request) de tipo *broadcast* (i.e. el mensaje va dirigido a todos los nodos). Un nodo que recibe un RREQ debe crear o actualizar una ruta hacia el nodo vecino que lo ha transmitido; de esta forma, cada nodo que recibe el mensaje RREQ puede crear una ruta en reversa hacia el nodo que generó el mensaje RREQ (i.e. el nodo fuente). Si el nodo que recibió el RREQ no es el destino y no conoce una ruta hacia él, retransmite el mensaje RREQ; de lo contrario, si este nodo es el destino o conoce una ruta válida para llegar al destino, responde con un mensaje RREP (Route Reply) de tipo *unicast* (i.e. el mensaje RREP va dirigido únicamente al nodo que solicitó la ruta). El mensaje será encaminado correctamente gracias a la ruta en reversa creada por los nodos intermedios que fueron procesando el mensaje RREQ. A lo largo de la trayectoria de regreso al nodo fuente, los nodos intermedios que reciben el mensaje RREP, registran en sus tablas de

enrutamiento una ruta hacia delante, de tal forma que estos nodos conocen una ruta para transmitir paquetes hacia el nodo destino.

Cada nodo registra en memoria durante un tiempo el descubrimiento de ruta (PATH_DISCOVERY_TIME), el identificador del mensaje y la dirección origen del mismo, esto con el fin de evitar procesar un mensaje que se haya recibido y procesado con anterioridad. Para prevenir que se difundan mensajes RREQ innecesariamente, se utiliza la técnica de búsqueda en Expansión de Anillo (*expanding-ring-search*). Esto se realiza mediante el control del campo Tiempo de Vida (TTL, Time To Live), el primer mensaje RREQ empezará con un TTL igual a TTL_START, el valor de TTL define el máximo número de saltos que un mensaje RREQ puede hacer a través de toda la red *ad-hoc* (i.e. este parámetro determina qué tan lejos se difunde el mensaje RREQ). Otro parámetro que se establece es (RING_TRAVERSAL_TIME), que determina el tiempo que tiene que esperar un nodo fuente a partir del envío de un RREQ hasta recibir su correspondiente RREP; si este tiempo expira sin la recepción del mensaje RREP, el nodo fuente difundirá un segundo mensaje RREQ, pero esta vez incrementará el valor de TTL con el parámetro TTL_INCREMENT (i.e. El TTL del segundo RREQ será TTL_START + TTL_INCREMENT). Este procedimiento continúa hasta que se recibe un RREP o el valor de TTL alcanza un valor TTL_THRESHOLD. Si TTL alcanza el valor de TTL_THRESHOLD, el siguiente RREQ será enviado con un TTL igual al máximo número de saltos posible determinado por el parámetro NET_DIAMETER; entonces se dice que se

ha realizado un proceso llamado “búsqueda global en la red” (*network-wide search*). Si aún después de realizar el proceso anterior no se recibe un RREP, el nodo puede intentar encontrar la ruta al destino, iniciando una nueva búsqueda global en la red hasta un máximo número de veces, determinado por el parámetro (RREQ_RETRIES). En la figura 11 se muestra el diagrama de flujo de este procedimiento.

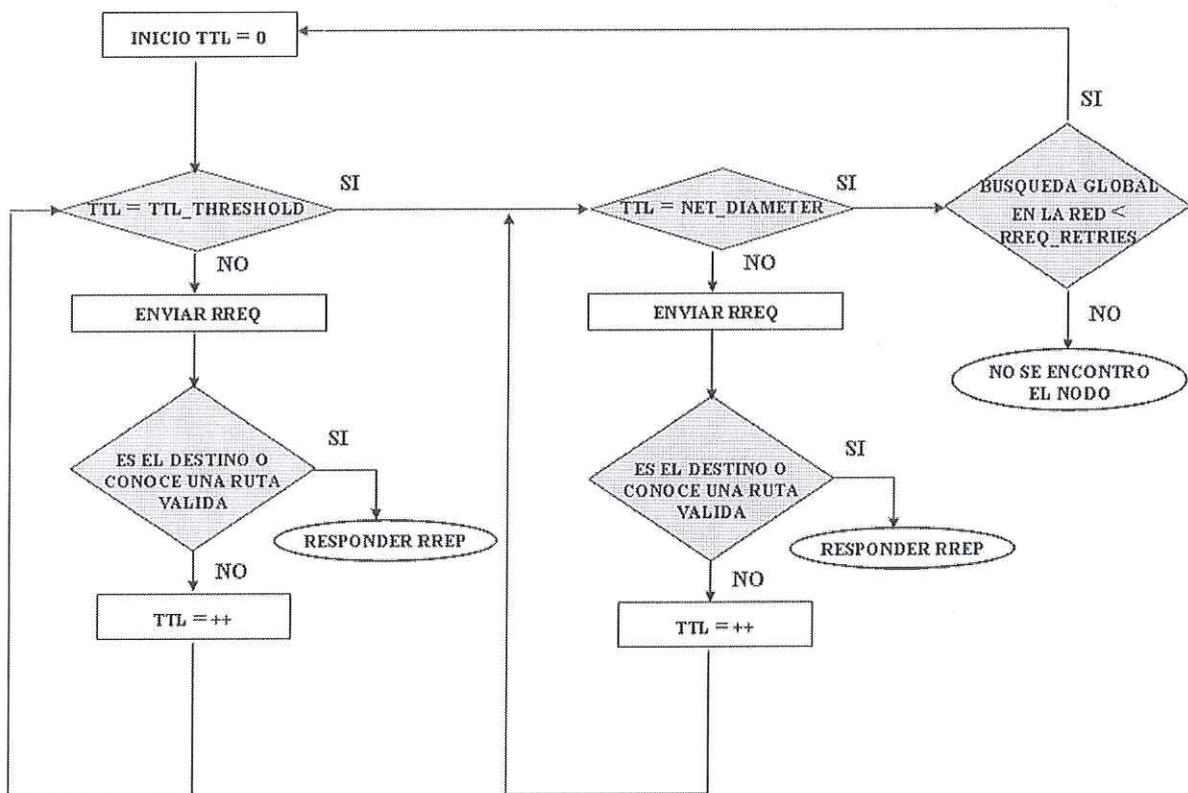


Figura 11. Diagrama de Flujo de la Búsqueda Global en la Red.

II.6.3 Mantenimiento de ruta

Cuando un nodo A detecta la pérdida de conectividad con otro nodo B vecino, que es el siguiente salto en una ruta activa, el nodo A procede a difundir un mensaje de error (RERR, Route Error) a sus vecinos. Este mensaje contiene la dirección IP del nodo B con el cual se ha perdido conectividad y por lo tanto se dice que es inalcanzable. Cuando otro nodo C recibe un mensaje RERR, éste busca en su tabla de enrutamiento si tiene registrado al nodo B que se ha convertido en inalcanzable; si esta ruta existe, entonces es invalidada y el nodo C procede a difundir un nuevo mensaje RERR a sus vecinos. Este proceso continúa hasta que el nodo fuente recibe el mensaje RERR, entonces éste procede a invalidar las rutas registradas y reinicia un nuevo proceso de descubrimiento de ruta [Perkins y Belding, 2003].

II.6.4 Formato del mensaje RREQ

0	8	13	24	31			
Tipo	J	R	G	D	U	Reservado	Cuenta de Saltos
RREQ ID							
Dirección IP Destino							
Número de Secuencia Destino							
Dirección IP Fuente							
Número de Secuencia Fuente							

Figura 12. Formato del mensaje RREQ del protocolo AODV

En la figura 12 se muestra la estructura básica del mensaje RREQ, la cual contiene los siguientes campos:

Tipo:	Indica el tipo del paquete, en este caso es igual a 1
J:	Bandera de Unión; reservada para <i>multicast</i>
R:	Bandera de Restablecimiento; reservada para <i>multicast</i>
G:	Indica si debe enviarse un RREP al nodo especificado por el campo dirección IP destino.
D:	Bandera Únicamente Destino, la cual indica que sólo el destino puede responder a este mensaje RREQ.
U:	Número de Secuencia Desconocido, indica que el número de secuencia es desconocido.
Reservado:	Campo reservado inicializado a 0.
Contador de saltos:	Número de saltos desde el nodo fuente hasta el destino
RREQ ID:	Número de secuencia identificado en conjunto con la dirección IP del nodo fuente.
Dirección IP Destino:	Indica la dirección IP del nodo solicitado.
Número de Secuencia Destino:	Último número de secuencia destino recibido por el nodo fuente, para cualquier ruta hacia algún destino.
Dirección IP Fuente:	Dirección IP del nodo el cual originó el RREQ.
Número de Secuencia Fuente:	Número de secuencia actual, para ser utilizado en el registro de ruta hacia el originador del RREQ.

II.6.5 Formato del mensaje RREP

0	8	9	10	19	24	31
Tipo	R	A	Reservado	Tamaño de Prefijo	Cuenta de Saltos	
Dirección IP Destino						
Número de Secuencia Destino						
Dirección IP Fuente						
Tiempo de Vida						

Figura 13. Formato del mensaje RREP del protocolo AODV

En la figura 13 se muestra la estructura básica del mensaje RREP, la cual contiene los siguientes campos:

- Tipo: Indica el tipo del paquete, en este caso es igual a 2
- R: Bandera de Restablecimiento; reservada para *multicast*.
- A: Bandera de Reconocimiento.
- Reservado: Campo reservado establecido a 0.
- Tamaño de Prefijo: Especifica que el próximo salto indicado puede ser utilizado para cualquier nodo con el mismo prefijo de enrutamiento.
- Contador de saltos: Número de saltos desde el nodo fuente hasta el destino
- Dirección IP Destino: Indica la dirección IP del nodo solicitado.
- Número de Secuencia Destino: Último número de secuencia destino recibido por el nodo fuente, para cualquier ruta hacia algún destino.
- Dirección IP Fuente: Dirección IP del nodo, el cual originó el RREQ.
- Tiempo de Vida: Tiempo de vida en milisegundos, para que los nodos que reciben un RREP consideren una ruta válida.

II.6.6 Formato del mensaje RERR

0	8	9	24	31
Tipo	N	Reservado	Cuenta Destino	
Dirección IP Destino Inalcanzable				
Número de Secuencia Destino Inalcanzable				
Dirección IP Destino Inalcanzable Adicional				
Número de Secuencia Destino Inalcanzable Adicional				

Figura 14. Formato del mensaje RERR del protocolo AODV

En la figura 14 se muestra la estructura básica del mensaje RERR, la cual contiene los siguientes campos:

- Tipo: Indica el tipo del paquete, en este caso es igual a 3
- N: Bandera, indica no suprimir ruta.
- Reservado: Campo reservado establecido a 0.
- DestCount: Número de destinos inalcanzables
- Dirección IP Destino Inalcanzable: Dirección IP del destino que se ha convertido en inalcanzable debido a un enlace perdido.
- Número de Secuencia Inalcanzable: Número de secuencia en la tabla de enrutamiento para un destino registrado previamente en el campo dirección IP destino inalcanzable.

II.7 RESUMEN

En este capítulo se definieron las principales topologías utilizadas en las redes inalámbricas, así como los diferentes tipos de capa física que se utilizan en el estándar 802.11, también se describió el método de acceso al medio para este tipo de redes y los problemas que se presentan al utilizar CSMA/CA. Por otro lado, se analizaron los principales protocolos de enrutamiento, haciendo énfasis en el protocolo AODV que es el que se utiliza en la arquitectura que se propone.

III IMPLEMENTACIÓN DE AODV EN REDES DE TIPO MALLA

III.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe detalladamente la lógica de funcionamiento con la que trabaja el protocolo propuesto. Como primer paso, se realiza la configuración de interfaces de los nodos malla, para lo cual se crearon tres nuevos mensajes. También se presentan las adaptaciones realizadas para que el protocolo AODV trabaje en una arquitectura de red de tipo malla. Otro aspecto abordado es el procedimiento para determinar quién es el nodo portal que otorga acceso hacia la red cableada y cómo descubrir a este nodo para establecer comunicación entre un nodo en la red inalámbrica y la red cableada.

III.2 CONSIDERACIONES

En la arquitectura propuesta se considera el siguiente escenario:

- a) Los nodos malla y el nodo portal cuentan con tres interfaces de radio, dos de las cuales se utilizan para la comunicación entre los nodos malla y en este caso, las interfaces pueden seleccionar su canal de operación. Mientras que

la interfaz restante se destina a la comunicación con el usuario final, el cual, está equipado con un dispositivo con conectividad inalámbrica y operando en modo *ad-hoc*.

- b) Se supone que se cuenta con por lo menos cinco canales disponibles sin traslape; todos los nodos malla iniciarán operando de la siguiente forma: interfaz 1 sintoniza el canal 1, interfaz 2 el canal 3, interfaz 3 el canal 5.
- c) Los nodos malla y el nodo portal poseen un contador para cada una de sus interfaces, el cual se incrementa cada vez que se utiliza un canal para establecer comunicación con un nodo vecino.
- d) Todos los nodos móviles (i.e. el usuario final) cuentan con una sola interfaz de radio operando en la siguiente manera: interfaz 1 sintoniza el canal 3.
- e) El alcance de transmisión para los nodos malla en las interfaces 1 y 3 es de 250m, mientras que en la interfaz 2 es de 150m.
- f) El alcance de transmisión de los nodos móviles (i.e. el usuario final) es de 150m.
- g) El canal 3 se ha establecido como canal común para comunicar nodos móviles (i.e. el usuario final) con los nodos malla.
- h) Todas las antenas son omnidireccionales.

III.3 CONFIGURACIÓN DE INTERFACES

En esta sección se presenta el procedimiento de configuración de las interfaces inalámbricas de los nodos malla y del portal. Primeramente, se crearon tres nuevos mensajes para el proceso de configuración de los nodos malla; con esta configuración se busca minimizar colisiones de paquetes y contienda por el acceso al medio físico, ya que se cuenta con múltiples canales no interferentes.

III.4 PROCESO DE CONFIGURACIÓN DE INTERFACES DE NODOS MALLA A UN SALTO DEL PORTAL

El primer paso en el proceso de configuración de interfaces se realizará para los nodos malla que se encuentren a un salto del portal, por lo tanto, necesitamos describir el funcionamiento de cada uno de los mensajes involucrados en este proceso.

III.4.1 Mensaje de configuración tipo 1 (CONF1)

El nodo portal inicia el proceso de configuración difundiendo un mensaje de configuración tipo 1 que se difunde en modo *broadcast* a sus nodos vecinos; este mensaje está basado en la estructura del mensaje RREQ. En este mensaje se incluye información sobre los canales en los que opera cada una de las interfaces inalámbricas del nodo que difunde el mensaje CONF1; ya que todos los nodos malla inician operando en los mismos canales, en cada una de sus interfaces, todos estos nodos pueden escuchar el mensaje de configuración CONF1.

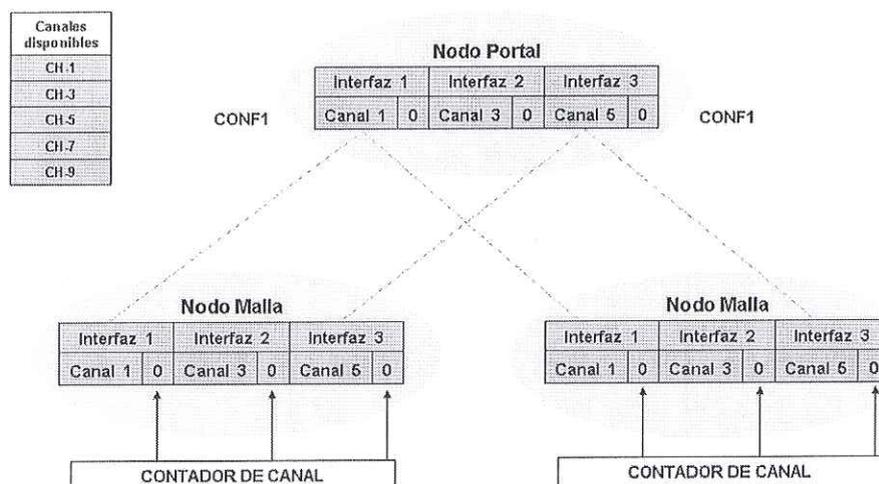


Figura 15. Inicio del proceso de configuración

En la figura 15 se muestra el nodo portal y dos nodos malla, todos estos nodos cuentan con tres interfaces de radio; cada una de las interfaces en un nodo selecciona un canal diferente. Se puede observar que los nodos malla cuentan con un contador de uso de canal, el cual se irá incrementando cada vez que se establezca un enlace por dicho canal.

Una vez que un nodo malla vecino recibe el mensaje CONF1, verifica la información contenida en el paquete de configuración. Como inicialmente todos los nodos malla operan en los mismos canales, existe más de un canal en común con el portal. El criterio para elegir qué canal se utilizará, se basa en elegir el canal con el menor número de uso, esto es determinado directamente por el contador de canales, el cual aun está en cero para todos los canales; por lo tanto, puede elegir cualquiera de los canales disponibles. Se elige sólo un canal para comunicarse con el portal, el cual puede estar operando en la

interfaz 1 o la interfaz 3. En el caso de elegir la interfaz 1, entonces se procede a cambiar el canal de operación de la interfaz 3 para evitar la interferencia en la comunicación entre el nodo malla y el nodo portal.

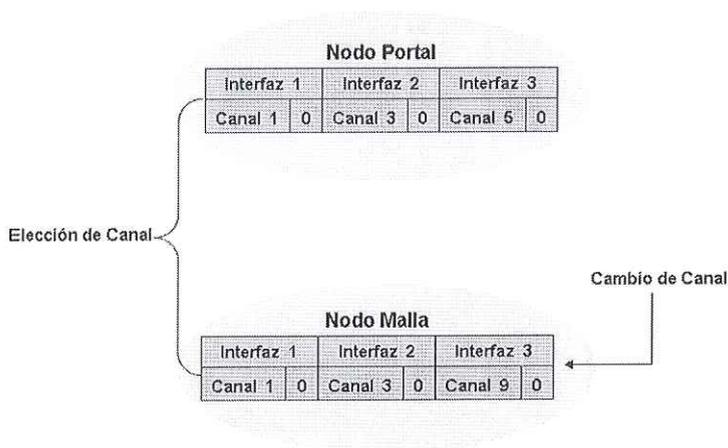


Figura 16. Elección de un canal Común para establecer comunicación entre un nodo malla y el portal

En la figura 16 se muestra que el nodo malla elige la interfaz 1, la cual sintoniza el canal 1 para establecer comunicación con el portal; también se muestra el cambio de canal realizado en la interfaz 3, la cual sintonizaba el canal 5 y ahora está en el canal 9.

III.4.2 Mensaje de configuración tipo 2 (CONF2)

Una vez que el nodo malla ha recibido un mensaje CONF1 y ha elegido un canal para comunicarse con el portal, éste le responde al portal con un mensaje de configuración

de tipo 2 que se transmite en modo *unicast*, este mensaje contiene información sobre el canal que ha seleccionado el nodo malla. Una vez que el mensaje de tipo 2 llega al portal, éste verifica que la información con la que él difundió el primer mensaje de configuración se mantenga tal y como estaba al momento de enviar el primer mensaje de configuración CONF1, es decir, que ningún otro nodo malla haya seleccionado los mismos parámetros antes.

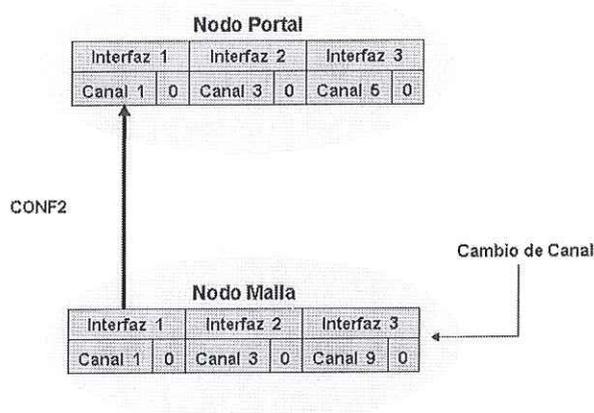


Figura 17. Respuesta del nodo malla hacia el portal

En la figura 17, se muestra cómo el nodo malla responde al portal con un mensaje de configuración de tipo 2, en este mensaje se especifica por qué canal establecerán comunicación.

III.4.3 Mensaje de configuración tipo 3 (CONF3)

Una vez que el nodo portal ha recibido el mensaje CONF2 y si no existe un conflicto con algún otro usuario que haya contestado a la petición original del mensaje CONF1, el portal incrementa el contador del canal que está siendo utilizado para comunicarse con el nodo malla, y entonces responde con un mensaje de tipo 3, informando que el proceso de configuración fue exitoso.

En la figura 18 se muestra cómo se incrementa el contador del canal 1, que es el que se está utilizando, para establecer comunicación con el nodo malla.

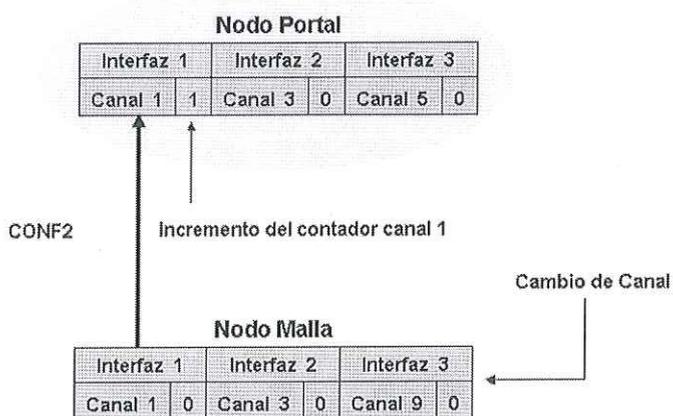


Figura 18. Incremento del contador de canal

En la figura 19, el portal envía un mensaje CONF3. El propósito de este mensaje es el de informar al nodo malla que el proceso de configuración ha sido exitoso

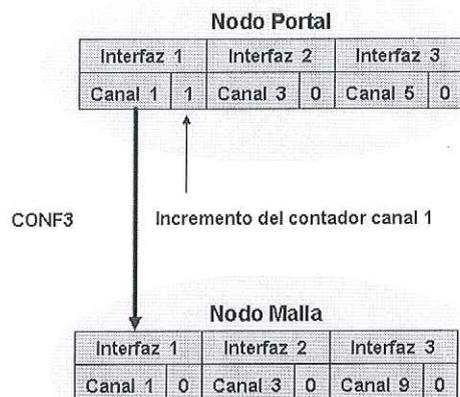


Figura 19. Respuesta del portal hacia el nodo malla, informando que la configuración fue correcta

Una vez que el nodo malla recibe el mensaje de configuración tipo 3, éste incrementa el contador del canal 1, dado que lo está utilizando para comunicarse con el portal, de esta forma se puede lograr que el siguiente nodo malla (i.e. que está a dos saltos del portal) que requiera configurarse, lo haga a través del canal con menor costo; en este caso el canal número 9, con esto se evita que haya interferencia cuando dos nodos malla adyacentes transmiten al mismo tiempo.

En la figura 20, se muestra cómo el nodo malla incrementa el contador del canal 1, ya que lo está utilizando para comunicarse con el nodo portal.

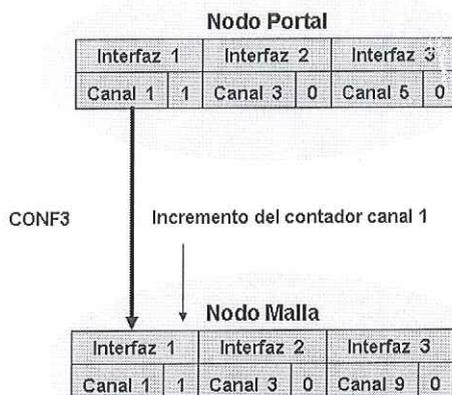


Figura 20. Incremento del contador del canal 1 en el nodo malla

Una vez incrementado el contador de canal del nodo malla, éste está en posibilidad de iniciar un nuevo proceso de configuración de interfaces con los nodos vecinos dentro de su área de cobertura.

III.5 PROCESO DE CONFIGURACIÓN DE INTERFACES DE NODOS MALLA A DOS O MÁS SALTOS DEL PORTAL.

Un aspecto importante a notar es, como ya se ha mencionado, que todos los nodos malla inician operando en los mismos canales. En la figura 21 se muestra cómo el

siguiente mensaje de configuración se envía por los canales 1 y 9, pero el nodo malla 2 sólo escucha por el canal 1, el cual tiene un costo mayor; por lo tanto, éste conmuta al canal 9, el cual tiene menor costo, con esto se logra que exista una diversidad de canales entre nodos adyacentes.

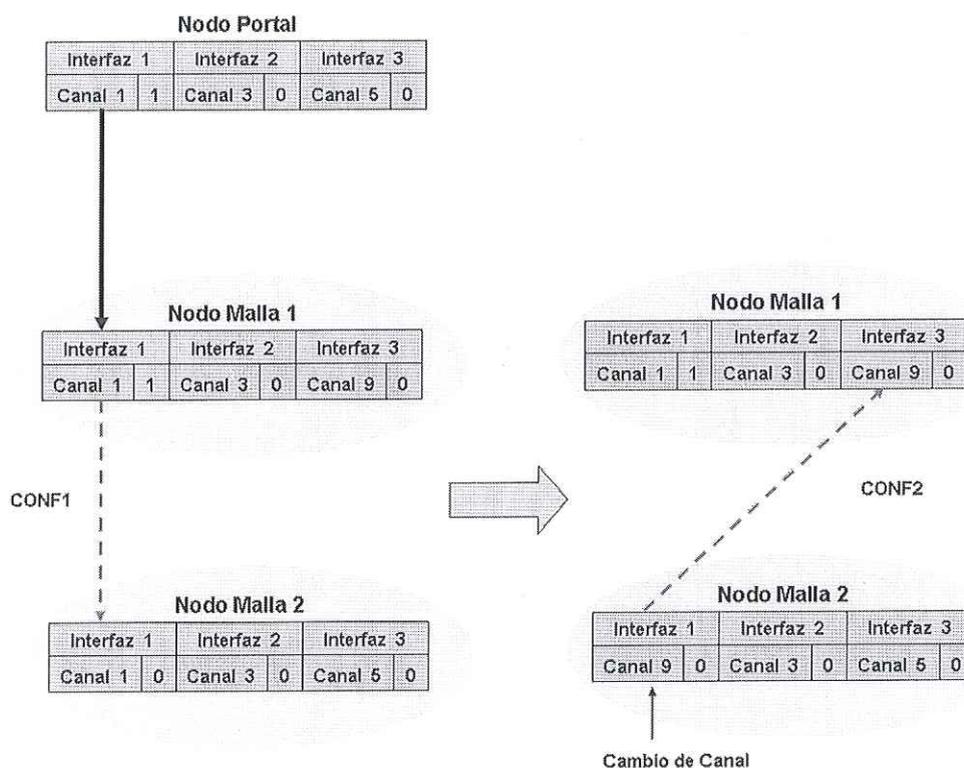


Figura 21. Cambio de interfaz para continuar el proceso de configuración

En la figura 22 se muestra cómo el nodo malla 1 incrementa el contador del canal 9 y responde al nodo malla 2 con un mensaje CONF3 para confirmar que el proceso de configuración fue exitoso. Por su parte, el nodo malla 2 recibe el mensaje CONF3 e

incrementa el contador del canal 9. Una vez realizado esto, ahora el nodo malla está en posibilidad de configurar a otros nodos que se encuentren dentro de su área de cobertura.

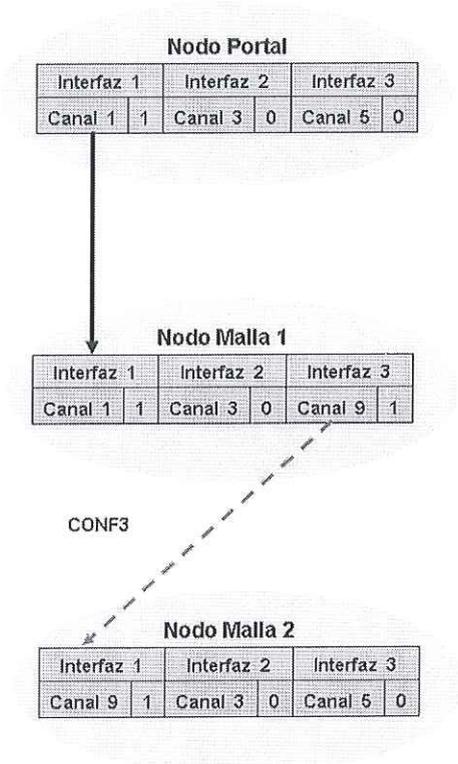


Figura 22. Segundo nodo malla configurado

III.6 ESCENARIO DEL NODO MALLA OCULTO

Cuando dos nodos malla, que están a un salto ya sea del nodo portal o de cualquier otro nodo malla previamente configurado, se encuentran realizando el proceso de configuración, se presenta un escenario semejante al del nodo oculto mostrado en la sección

II.4.1. En la figura 23, podemos observar como el nodo malla 1 requiere configurarse con el nodo portal, pero este no conoce la existencia del nodo malla 2 que también requiere configurarse con el nodo portal.

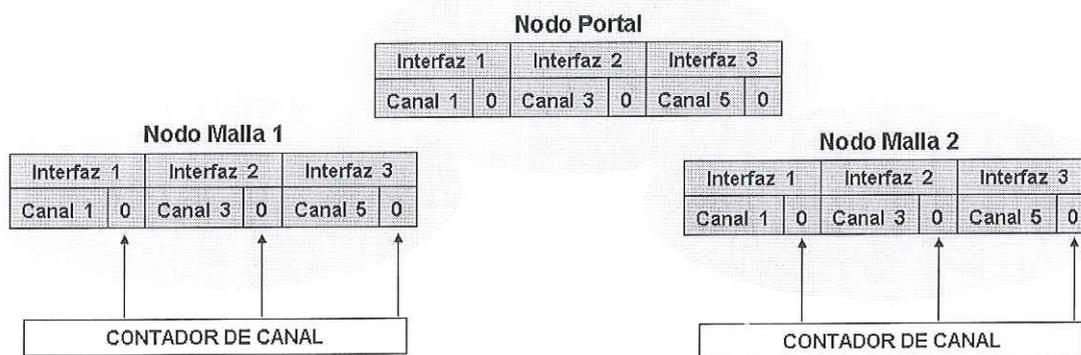


Figura 23. Escenario del nodo malla oculto

Como todos los contadores de canal están en cero, supongamos el mejor de los casos donde el nodo malla 1 selecciona el canal 1 para establecer comunicación con el nodo portal y el nodo malla 2 selecciona el canal 5 para comunicarse con el portal, en este escenario no se presenta ningún problema ya que el nodo portal se comunica con los dos nodos malla en diferentes canales y por lo tanto el proceso de configuración puede continuar de forma normal, tal y como se muestra en la figura 24.

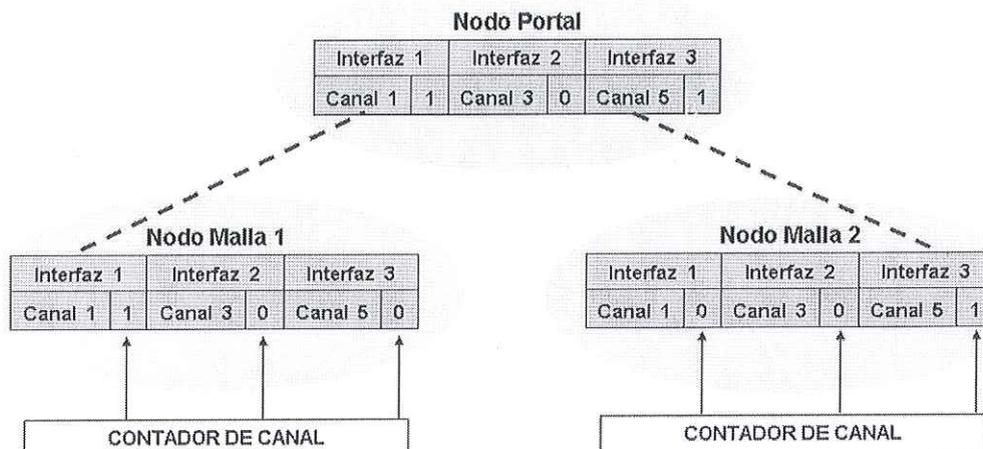


Figura 24. Los nodos malla elijen canales diferentes para comunicarse con el portal

Ahora se analiza el siguiente escenario donde los nodos malla 1 y 2 elijen el mismo canal para comunicarse con el nodo portal.

El nodo portal difunde un mensaje de configuración CONF1, a sus nodos vecinos, como el nodo malla 1 no conoce de la existencia del nodo malla 2 y viceversa, el mensaje llega a los dos nodos con los mismos parámetros, el nodo malla 1 selecciona el canal 1 para establecer comunicación con el portal, y a su vez el nodo malla selecciona también el canal 1. Ambos nodos le responden al portal con un mensaje de configuración CONF2, uno de estos mensajes tendrá que llegar primero debido a que estos nodos compiten por el medio de acuerdo a CSMA/CA discutido en la sección II.4.1, supongamos que el mensaje que llega primero al nodo portal es el que proviene del nodo malla 1, en ese momento el portal

actualizara sus parámetros (i.e. aumentará el contador del canal 1), y el proceso de configuración continua normalmente con el nodo malla 1, como se muestra en la figura 25.

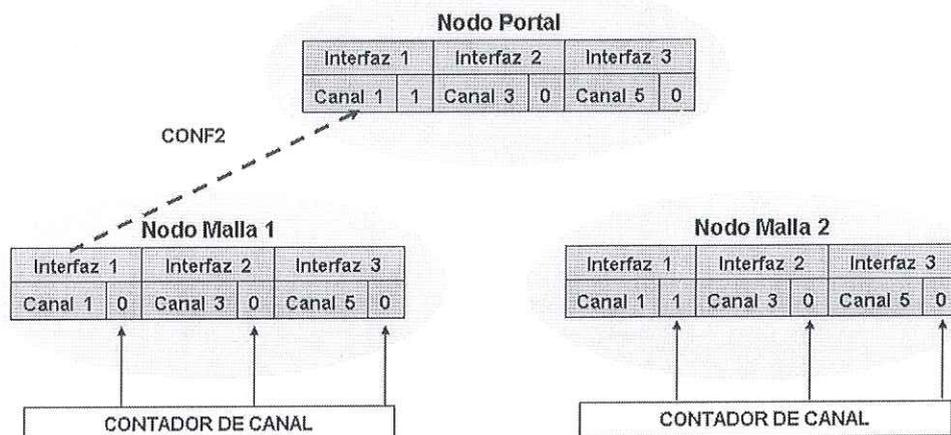


Figura 25. El nodo portal recibe el mensaje CONF2 del nodo malla 1

Por otro lado, después de un tiempo el nodo portal recibe el mensaje CONF2 proveniente del nodo malla 2, pero el nodo portal determina que el canal 1 ya incrementó su costo (i.e. aumento el contador de uso), por lo tanto los parámetros con los que se quiere configurar el nodo malla 2 ya no son validos, como se muestra en la figura 26.

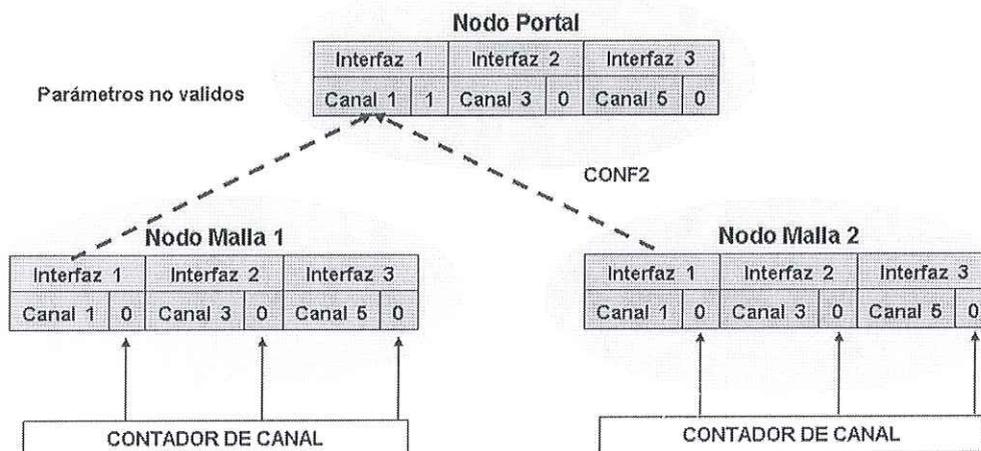


Figura 26. El portal recibe en mensaje CONF2 con parámetros no validos

Para evitar que el nodo malla 2 utilice el mismo canal que el nodo malla 1, el nodo portal difunde nuevamente un mensaje de configuración de tipo uno (i.e. CONF1) con parámetros actualizados, todos los vecinos escucharan este nuevo mensaje incluyendo al nodo malla 1, pero solo lo procesarán aquellos nodos que no estén configurados, figura 27.

Como el nodo malla 2 aun no está configurado recibe el nuevo mensaje CONF1, restablece sus valores designados por default y comienza nuevamente con el proceso de configuración descrito en la sección III.4

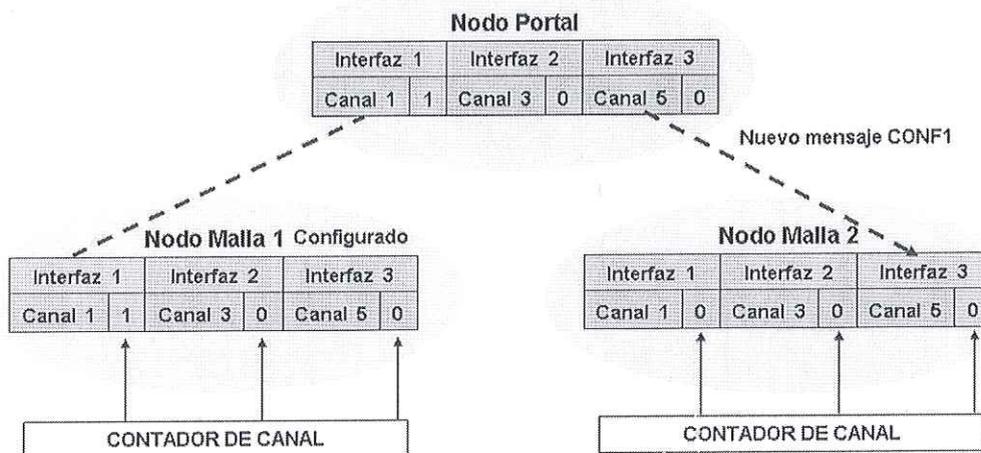


Figura 27. EL Portal Difunde un Nuevo Mensaje CONF1

III.7 INTEGRACIÓN DE AODV EN REDES DE TIPO MALLA

Una vez configuradas las interfaces de los nodos malla, es necesario hacer compatible el funcionamiento del protocolo AODV con la arquitectura de red malla, ya que AODV no considera el uso de nodos con interfaces múltiples. Debido que en el simulador Network Simulator 2 (NS-2) existe una sola función que procesa el envío y recepción de paquetes se debe de especificar la interfaz por la cual fue transmitido cada paquete. Para lograr esta integración, se utilizó la parte reservada en el formato de los mensajes RREQ y RREP, agregando un campo llamado “No. Interfaz” para identificar la interfaz por la cual se está transmitiendo el mensaje, esta información permite crear correctamente las rutas para establecer comunicación entre dos nodos que así lo requieran, tal y como se muestra en los formatos de los mensajes RREQ y RREP de las figuras 28 y 29, respectivamente. Con dispositivos reales se identificaría automáticamente la interfaz por la que se recibe un

mensaje, ya que cada una de estas es independiente, por lo tanto no sería necesario incluir el campo “No. Interfaz”. Una vez que el nodo receptor identifica por que interfaz a recibido un mensaje deberá guardar ésta información para poder crear las rutas en reversa y hacia a delante.

0	8	14	22	24	31				
Tipo	J	R	G	D	U	I	No. Interfaz	Reservado	Cuenta de Saltos
RREQ ID									
Dirección IP Destino									
Número de Secuencia Destino									
Dirección IP Fuente									
Número de Secuencia Fuente									

Figura 28. Formato extendido del mensaje RREQ

0	8	11	19	24	31	
Tipo	R	A	I	No. Interfaz	Tamaño de Prefijo	Cuenta de Saltos
Dirección IP Destino						
Número de Secuencia Destino						
Dirección IP Fuente						
Tiempo de Vida						

Figura 29. Formato Extendido del mensaje RREP

Como se ha mencionado, estos campos son utilizados para identificar la interfaz por la cual se transmite el mensaje para la correcta creación de rutas; esto es necesario porque un nodo malla puede recibir diferentes mensajes por cualquiera de sus interfaces. Con esta extensión se hace transparente el escenario implementado para el protocolo de enrutamiento AODV y su funcionamiento es exactamente el mismo como el descrito en el

capítulo anterior. Además se agregó una bandera I en ambos mensajes; esta bandera (de la que se hablará a continuación), se utilizará para lograr conectividad con Internet.

III.8 CONECTIVIDAD A INTERNET EN REDES DE TIPO MALLA

Una vez que tenemos el protocolo AODV funcionando con nodos de una interfaz y nodos con interfaces múltiples operando en el dominio inalámbrico, nos disponemos a extender la conectividad hacia Internet. Este trabajo se basó en las propuestas existentes en la literatura para solucionar este problema [Wakikawa et al., 2003], las cuales describen cómo proporcionar conectividad a Internet a las redes móviles *ad-hoc*. Otros trabajos, como el de [Hamidian, 2003], incorporan diferentes métodos (i.e. proactivo, reactivo e híbrido) para el descubrimiento del portal de acceso a Internet. A continuación, describiremos cómo se realizó ésta extensión en nuestra arquitectura.

III.8.1 Descubrimiento del portal

Para que un nodo de la red inalámbrica sea capaz de dirigir tráfico hacia Internet, éste debe conocer o descubrir que existe un nodo especializado para ofrecer este servicio. Existen diferentes métodos para lograr este objetivo.

Descubrimiento del portal en forma proactiva: el mismo portal difunde mensajes a lo largo y ancho de la red, en los cuales anuncia su presencia; con este enfoque, se logra un retardo pequeño cuando algún nodo requiere enviar paquetes al nodo portal, sin embargo, se incrementa la sobrecarga de la red debido a la difusión proactiva de los mensajes de control.

Otra posibilidad consiste en el descubrimiento del portal de forma reactiva, en este caso los nodos son los que inician el descubrimiento del portal de acceso a Internet sólo cuando requieren comunicarse con algún nodo ubicado en Internet. Con este enfoque, se tiene un ahorro en ancho de banda ya que sólo se difunden mensajes de control cuando se requiere descubrir una ruta hacia el portal; por otro lado, se presenta un mayor retardo en el establecimiento de la comunicación.

Por último, es posible utilizar una combinación de ambos enfoques, uno operando en forma proactiva limitado a una zona específica, es decir, con los nodos cercanos; y otro operando en forma reactiva para nodos más lejanos del portal de acceso. En nuestro escenario, utilizaremos el método reactivo para el descubrimiento del portal de acceso.

III.8.2 Comunicación entre un nodo móvil y un nodo en Internet

Supongamos que un nodo móvil A, requiere comunicarse con un nodo B, y que A no tiene registrada una ruta en su tabla de enrutamiento para llegar a B; en otras palabras, el nodo A no tiene conocimiento sobre la ubicación del nodo B, ya que éste puede estar dentro de la red inalámbrica o localizado en Internet. Utilizando AODV como protocolo de enrutamiento, A difundirá un mensaje RREQ, solicitando una ruta hacia B. Si B es un nodo móvil localizado dentro de la red inalámbrica, éste u otro nodo que conoce una ruta hacia B, responderán con un RREP al nodo móvil A, como se muestra en las figuras 30 y 31.

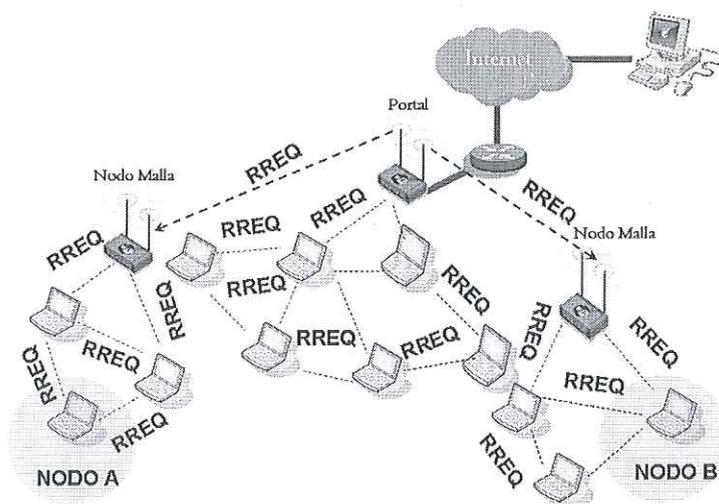


Figura 30. El nodo A, en busca de una ruta hacia B

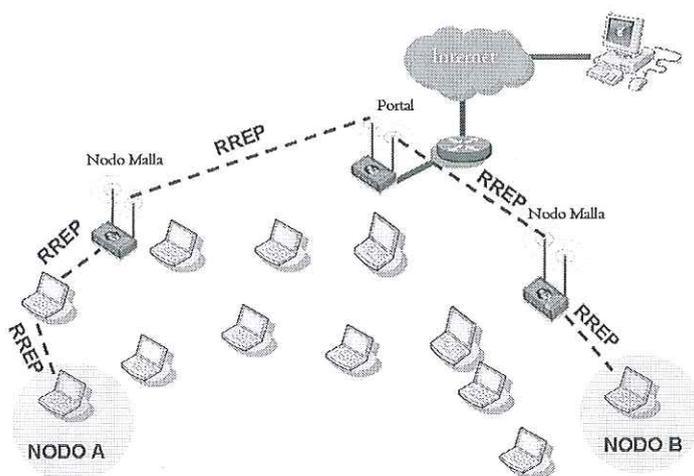


Figura 31. El nodo B, responde a la solicitud de A

Sin embargo, si B es un nodo localizado en Internet, ningún nodo móvil en la red inalámbrica responderá a la solicitud. Entonces, ¿cómo puede A encontrar una ruta hacia B? De acuerdo con [Wakikawa et al., 2003], si A difunde un RREQ pero no existe un nodo que pueda responder a esta solicitud, A determina que B es un nodo localizado en Internet y por lo tanto, envía los paquetes de datos utilizando una ruta por default. Pero, ¿cuántos mensajes RREQ se tienen que enviar antes de considerar que el nodo solicitado se encuentra en Internet? En este trabajo, el nodo A deberá realizar al menos un proceso *network-wide search* descrito en el capítulo II, para estar completamente seguros de que el nodo no se encuentra dentro de la red inalámbrica. La forma de determinar cuantos procesos *network-wide search* se deben realizar antes de que se asuma que el nodo que se esta buscando se encuentra en Internet, varía dependiendo si el nodo móvil se comunica con mayor frecuencia hacia Internet o con nodos dentro de la red inalámbrica, por lo tanto el

parámetro *network-wide search* puede ser sintonizable. Por otra parte, debemos mencionar como es que los nodos móviles conocen la ruta designada por default.

La ruta por default se obtiene durante el proceso de descubrimiento de ruta, ya que, siempre el nodo portal recibe un mensaje RREQ, éste verifica en su tabla de enrutamiento si conoce cómo llegar al destino indicado, si éste conoce cómo llegar responde con un RREP, si no conoce cómo llegar al destino responde con un RREP extendido como el de la figura 28, este mensaje va dirigido hacia el nodo fuente; y después retransmite el RREQ normalmente. De esta forma, el nodo móvil obtiene una ruta por default aunque no la haya solicitado, esto le permite conocer la ruta hacia el nodo portal y por lo tanto tener acceso a Internet. La principal ventaja es que se mantiene actualizada la ruta hacia el portal, con la respectiva desventaja de utilizar recursos de la red. Sin embargo, debido a que el mensaje RREP extendido (RREP_E) se transmite de forma *unicast* no genera demasiado tráfico en la red.

En la figura 32, se muestra cuando el nodo A está en busca del nodo B, por lo tanto difunde un mensaje RREQ a lo largo de la red.

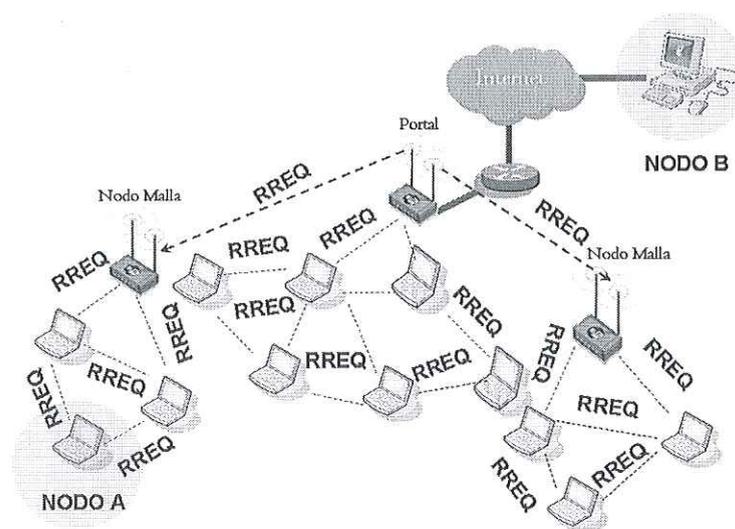


Figura 32. El nodo A, busca la ruta hacia el nodo B

En la figura 33, se puede observar, que el nodo B se encuentra en Internet y por lo tanto ningún nodo dentro de la red inalámbrica ha respondido a la solicitud RREQ, sin embargo el portal, responde con un mensaje RREP_E al nodo fuente, en el cual se le informa cual es la ruta por default; y después de que sea realizado un proceso *network-wide-search* sin respuesta, el nodo móvil, determina que el nodo B esta en Internet y envía los paquetes por la ruta por default.

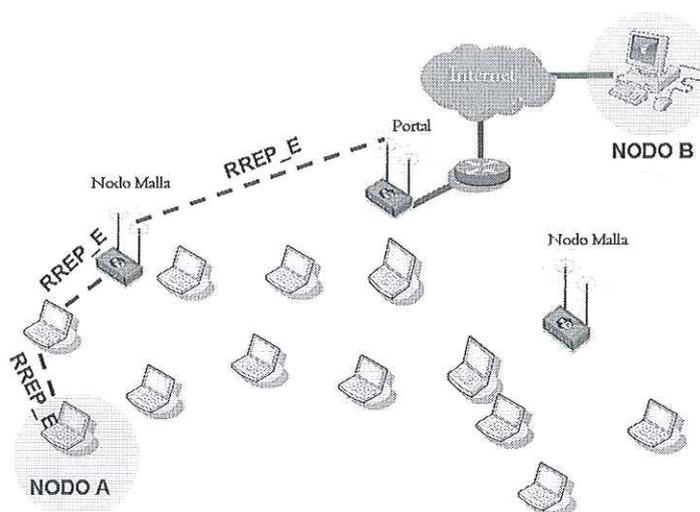


Figura 33. El nodo portal responde con un RREP_E, a la solicitud de A

III.8.3 Tabla de enrutamiento

Como se ha discutido anteriormente, después de realizar el proceso *network-wide search* sin recibir un correspondiente RREP, el nodo fuente asume que el destino se encuentra en Internet. De acuerdo con [Wakikawa et al., 2003], el nodo fuente envía paquetes de datos utilizando una ruta establecida por default. Por medio de esta ruta el nodo fuente crea un registro hacia el nodo destino en su tabla de enrutamiento; pero esto es una desventaja, ya que el número de nodos fijos es mucho mayor que el de nodos móviles. Si un nodo móvil desea comunicarse con muchos nodos fijos, la tabla de enrutamiento crecerá rápidamente. Sin embargo, esto no es tan alarmante como parece ya que AODV elimina de sus registros aquellas rutas que no son utilizadas después de cierto tiempo, evitando que las tablas de enrutamiento crezcan sin control.

III.9 RESUMEN

En este capítulo se propuso un mecanismo para la configuración de interfaces con las que cuentan los nodos malla, esta configuración básicamente consiste del intercambio de tres nuevos mensajes de control (CONF1, CONF2, y CONF3). También, se describió la extensión de los formatos de los mensajes RREQ y RREP para lograr hacer compatible la arquitectura de red propuesta con el protocolo de enrutamiento AODV. Además, se estableció el criterio para determinar cuándo un nodo que se está buscando en la red inalámbrica, se encuentra en la red cableada.

IV ESCENARIOS Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN

IV.1 INTRODUCCIÓN

En este proyecto se utilizó el simulador de redes Network Simulator 2 (NS-2), [McCanne y Floyd, 1995] versión 2.29 como herramienta para evaluar el desempeño del protocolo y la arquitectura propuesta, éste fue elegido por sus características de código abierto, lo cual nos permite extender y adaptar el código a nuestras necesidades.

IV 2 SIMULADOR DE REDES NS-2

Network Simulator 2 es un simulador de eventos discretos orientado a objetos, enfocado a la investigación de redes cableadas e inalámbricas [Altman y Jiménez, 2004]. Implementa una gran variedad de protocolos [Fall y Varadhan, 2007], entre los cuales encontramos los protocolos de transporte TCP y UDP, generadores de tráfico como FTP, TELNET, CBR, VBR, diferentes mecanismos de gestión de colas, algoritmos de enrutamiento y multidifusión, entre otros. NS-2 fue implementado en C++, y utiliza un intérprete OTcl para la ejecución de escenarios de simulación. Este soporta dos clases

jerárquicas: una jerarquía compilada en C++ [Deitel y Deitel, 2004] y una jerarquía interpretada OTcl, con una correspondencia uno a uno entre ambas.

Debido a que NS-2 es un simulador de eventos discretos, cada evento⁴ cuenta con un identificador único y estos eventos forman una lista ordenada cronológicamente. El planificador dirige los eventos secuencialmente, por lo tanto, la hora del sistema es la hora del evento actual. Los componentes de red se comunican unos con otros pasándose paquetes, lo cual no consume tiempo de simulación. Para simular que un componente emplea cierto tiempo para procesar un paquete, se planifica ese mismo paquete en otro evento posterior. Estos eventos se calendarizan por medio de cronómetros (*timers*); su uso típico es permitir que los protocolos hagan determinadas acciones al concluir cierto tiempo.

Para realizar una simulación en NS-2, se elabora un archivo utilizando una serie de instrucciones en OTcl para definir una serie de componentes de la simulación como el inicio del planificador de eventos, configurar la topología de la red utilizando las librerías de componentes y configuración, indicar a las fuentes de tráfico cuándo iniciar y detener la transmisión de paquetes.

Un diagrama simplificado de los componentes del simulador NS-2, desde el punto de vista del usuario se presenta en la Figura 34.

⁴ Un evento es cualquier comando ns/tcl válido

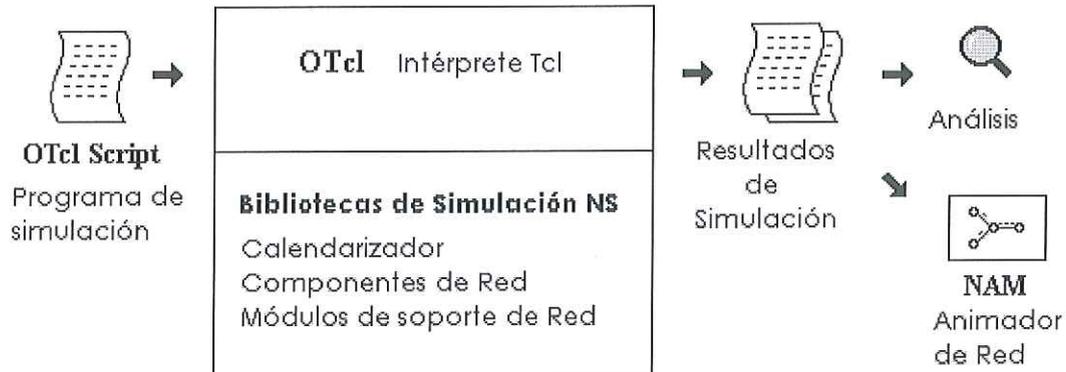


Figura 34. Simulador de red NS-2

Por otro lado, es posible obtener resultados a través de archivos de salida, generados con la simulación e incluso visualizarlos gráficamente a través del animador de redes llamado NAM (*Network Animator*), como se muestra en la figura 35.

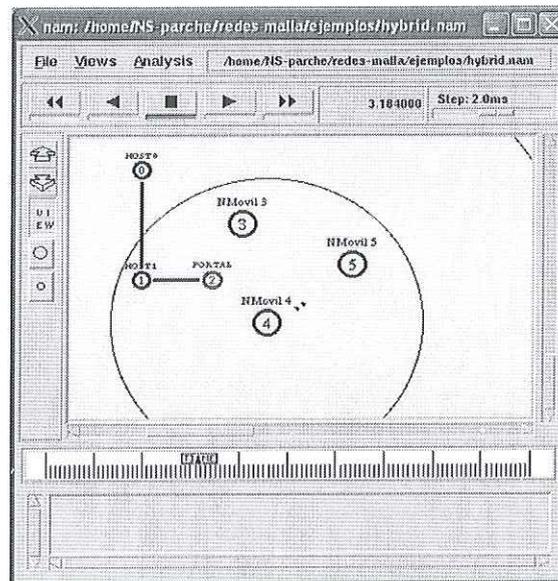


Figura 35. Visualizador Grafico NAM

IV.3 MODELOS DE PROPAGACIÓN DE RADIO PARA NS-2

Los modelos de propagación de radio que implementa NS-2 son: modelo de espacio libre, modelo de reflexión de dos rayos, y modelo de sombreado, a continuación se describen los modelos mencionados:

IV.3.1 Modelo de Espacio libre (Free Space)

El modelo de propagación de espacio libre supone condiciones de propagación ideales donde solo existe una trayectoria de visibilidad entre transmisor y receptor. Friss presentó una ecuación para calcular la potencia en el espacio libre a una cierta distancia del transmisor [Rappaport, 1999]. En el anexo A.1 se presentan mayores detalles del modelo de propagación de espacio libre utilizados en NS-2.

IV.3.2 Modelo de Dos Rayos (Two-Ray Ground Reflection)

Debido a que un solo trayecto de visibilidad entre dos nodos móviles raramente es el único medio de propagación, el modelo de dos rayos considera la trayectoria de visibilidad y la trayectoria de reflexión en tierra. Este modelo entrega una predicción más exacta en distancias largas que el modelo de espacio libre. En el anexo A.2 se presentan mayores detalles sobre este modelo de propagación.

IV.3.3 Modelo de Sombreo (Shadowing)

El modelo de espacio libre y el modelo de 2 rayos predicen la potencia recibida como una función determinística de la distancia. Ellos presentan el rango de comunicación como un círculo ideal. En realidad, la potencia recibida a cierta distancia es una variable aleatoria debido a los efectos de propagación multitrayectoria, también conocida como efecto de desvanecimiento. Los modelos anteriores predicen la potencia media recibida a una cierta distancia. Un modelo más general y amplio es llamado de sombreado. El modelo de sombreado consiste en dos partes. La primera es conocida como modelo de pérdida de trayecto, el cual predice la potencia media recibida a una distancia d , la segunda parte del modelo refleja la variación de la potencia recibida a una cierta distancia [Fall y Varadhan, 2007]. Para mayor detalle sobre este modelo de propagación ver anexo A.3.

IV.3.4 Modelo de Movilidad Random Waypoint

Este modelo de movilidad se basa en que los nodos describen un movimiento en tramos rectos establecidos por un punto origen y destino (*waypoints*), situados en un espacio acotado (normalmente un área cuadrada de dimensiones X_{max} y Y_{max}). La velocidad se elige con una distribución uniforme en el intervalo $[V_{min}, V_{max}]$. Al llegar a su destino el nodo se detiene por un instante de tiempo determinado por el parámetro (Pause) y nuevamente elige un próximo destino y una nueva velocidad [Johnson et al., 1996].

IV.4 Extensiones de funcionamiento de NS-2.29

Debido a que NS-2.29 en su versión original no incorpora las funcionalidades requeridas para la implementación de una arquitectura de red tipo malla, se utilizaron varios trabajos como base para poder obtener el soporte en el escenario requerido. Una de las limitaciones de NS-2.29 es que no cuenta con nodos inalámbricos trabajando con más de una interfaz de radio. Para lograr esta extensión de funcionalidad, nos basamos en el trabajo de [Raniwala y Chiueh, 2005], además de que la versión original del protocolo AODV, implementado en NS-2.29, no cuenta con soporte para establecer comunicación con nodos cableados; para solucionar esto, nos basamos en el trabajo de [Hamidian, 2003].

A su vez, también se trabajó en extensiones propias de nuestro escenario de simulación, como fue la creación de los tres nuevos mensajes de configuración descritos en el capítulo anterior, así como las adaptaciones necesarias para el funcionamiento del protocolo AODV en una arquitectura de red malla, todo esto realizado con las bibliotecas de NS-2.

IV.5 MÉTRICAS PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DE LA RED

Una red de comunicaciones debe ser capaz de transportar el tráfico de los usuarios hasta el destino indicado. El desempeño de una red de comunicaciones, puede afectar el nivel de satisfacción de los usuarios, ya que estos pueden requerir de altas tasas de

transmisión con el menor retardo posible, esto dependiendo de la aplicación requerida, entre las cuales encontramos la transmisión de: audio, video, datos, etc. Por lo tanto, es necesario evaluar el desempeño de la red a través de diferentes métricas dentro de las cuales encontramos: Caudal Eficaz, Retardo, Pérdida de Paquetes y Variación del retardo [Toh, 2002; Tanenbaum, 2003]

IV.5.1 Caudal Eficaz

Se define como la cantidad de información que ha llegado exitosamente al receptor, el caudal eficaz se puede expresar en porcentaje. La ecuación (1) muestra como se realiza el cálculo, donde PR son los paquetes totales recibidos y PT son los paquetes totales enviados.

$$C = \frac{PR}{PT} \times 100 \quad (1)$$

IV.5.2 Retardo

El retardo se define como el tiempo que transcurre desde que un paquete es enviado por un nodo fuente a través del medio de comunicación hasta que éste es recibido por la estación destino y es medido en segundos; la ecuación (2) muestra cómo se realiza el cálculo, donde TR es el tiempo de transmisión del paquete y TT es el tiempo en el que se recibe el paquete.

$$R = TR - TT \quad (2)$$

IV.5.3 Pérdida de Paquetes

La pérdida total de paquetes se define como la cantidad de paquetes que se enviaron menos la cantidad de paquetes que se recibieron. Ésta se puede medir en porcentaje, como se muestra en la ecuación 4; donde PT es la cantidad de paquetes enviados y PR es la cantidad de paquetes recibidos.

$$PP = \frac{PT - PR}{PT} \times 100 \quad (3)$$

IV.5.4 Variación en el Retardo (Jitter)

El jitter se define como la variación en el tiempo de llegada de los paquetes, el jitter puede ser causado por congestión en la red o por las diferentes rutas que siguen los paquetes hasta llegar a su destino. Las comunicaciones en tiempo real son las más sensibles a este efecto. El jitter se puede calcular con la ecuación 4 donde RP es el retardo promedio, RM es el retardo máximo y Rm es el retardo mínimo.

$$J = \frac{(RM - RP) + (RP - Rm)}{2} \quad (4)$$

IV.6 PARÁMETROS GENERALES DE SIMULACIÓN

Para evaluar el protocolo propuesto se simularon diferentes escenarios, de donde se obtuvieron los datos necesarios para presentar las métricas de desempeño de nuestro protocolo. Todas las simulaciones se realizaron con la infraestructura mencionada en el capítulo I.

En todas las simulaciones se consideró un medio de transmisión ideal, ya que no hay pérdida de bits o paquetes debido a ruido, desvanecimientos o interferencia. Solamente se consideraron pérdidas debido desbordamiento de memoria (buffer) de los nodos, así como colisiones de paquetes.

Con el primer escenario se pretende mostrar cómo es el desempeño de la red con nodos que cuentan con interfaces múltiples de radio, por tal motivo se realiza una simulación exactamente bajo el mismo escenario, pero con nodos equipados con una sola interfaz y se comparan los resultados obtenidos.

IV.6.1 Escenario 1

Como primer caso, se propone un escenario el cual se compone de cinco nodos malla, un nodo móvil, un portal de acceso y dos nodos en la red cableada. La topología es

un área rectangular de 1000m x 1500m. El nodo móvil 1 en un inicio se encuentra a un salto del portal de acceso, después el nodo se aleja a razón de un salto hasta que éste se encuentra a seis saltos del portal, Se realizan simulaciones independientes a cada salto que el nodo móvil transmisor se aleja del portal con una duración total de 300 segundos. El nodo móvil 1 comienza a transmitir datos al nodo 0 después de 100 segundos de haber comenzado cada simulación y termina a los 200 segundos.

La representación gráfica del simulador NAM se muestra en la figura 36, pero debido a que su visualización no es muy clara para los fines ilustrativos de este documento, se incluye su equivalente en la figura 37.

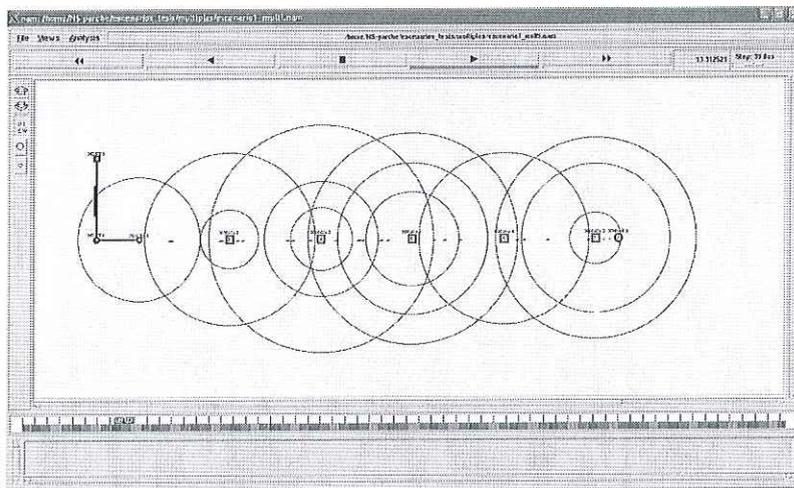


Figura 36. Escenario 1 NAM

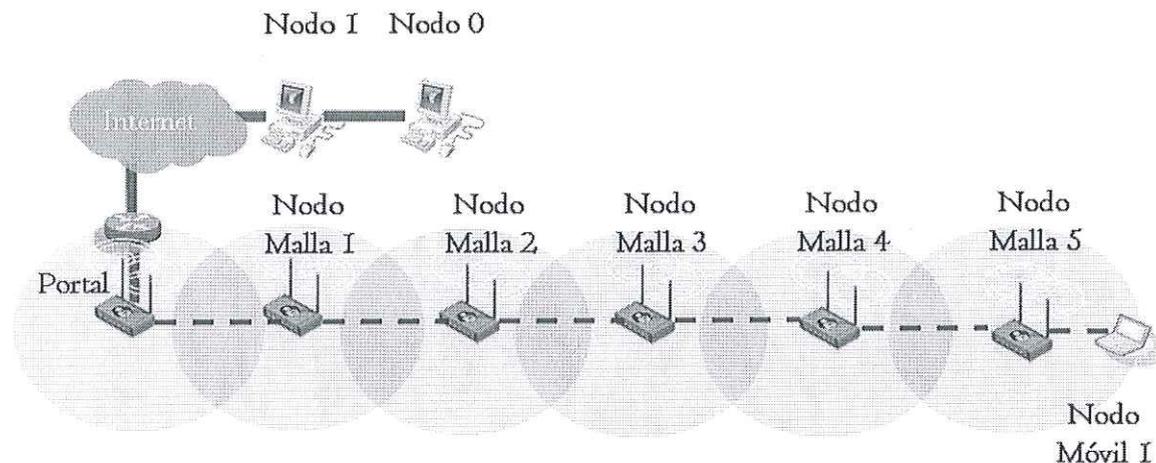


Figura 37. Escenario 1

En la tabla 2 se muestran los parámetros de simulación utilizados en el escenario 1, podemos observar que la tasa de transmisión de los nodos móviles se establece en 0.5 Mbps, 1Mbps y 1.5 Mbps también vemos que la Velocidad Promedio es cero, ya que en este escenario lo que se quiere comparar es el comportamiento conforme el nodo móvil incrementa el número de saltos hasta alcanzar al portal de acceso.

Tabla II. Parámetros de Simulación Escenario 1

Parámetro	Valor
Protocolo de Transporte	UDP
Tipo de Tráfico	CBR
Tamaño de Paquete	512
Protocolo de Enrutamiento	AODV
Control de Acceso al Medio	CSMA/CA
Modelo de Canal Radio	Dos-Raycs
Tasa Máx. de Transmisión	2 Mbps
Rango de TX Nodos Malla	250 m.
Rango de TX Nodos Móviles	40 m.
No. Interfaces Nodos Móviles	1
No. Interfaces Nodos Malla	3
Número de Canales	5
Modulación	DSSS
Tiempo de Simulación	300 s
Tamaño de Topología	1000 x1500
No. Nodos Móviles	1
No. Nodos Malla	6
No. Portales	1
Tasa de Transmisión	0.5,1,1.5 Mbps
Velocidad Promedio	0

IV.6.1.1 Resultados de Simulación Escenario 1

En la figura 38, se observan las gráficas que muestran el comportamiento del caudal eficaz conforme el nodo móvil se aleja incrementando el número de saltos hacia el portal. Se puede observar que a la distancia de un salto el comportamiento es idéntico para ambas arquitecturas con una interfaz y múltiples interfaces. Cuando se incrementa el número de saltos el caudal eficaz se mantiene al 100% para la arquitectura con múltiples interfaces a tasas de transmisión de 0.5 y 1 Mbps, mientras que en la arquitectura con una sola interfaz

el caudal eficaz va decayendo conforme aumenta el número de saltos, ya que todos los nodos transmiten por el mismo canal se presentan colisiones de paquetes debido que existe mayor contienda por el medio de transmisión. También se observa que cuando la tasa de transmisión aumenta el caudal eficaz decae más rápidamente. Por otro lado, cuando se transmite a una tasa de 1.5 Mbps se observa que a un salto el caudal eficaz es de aproximadamente del 88%, esto debido a que la máxima tasa de transmisión que se obtiene entre dos nodos transmitiendo a un salto es de 1.4 Mbps.

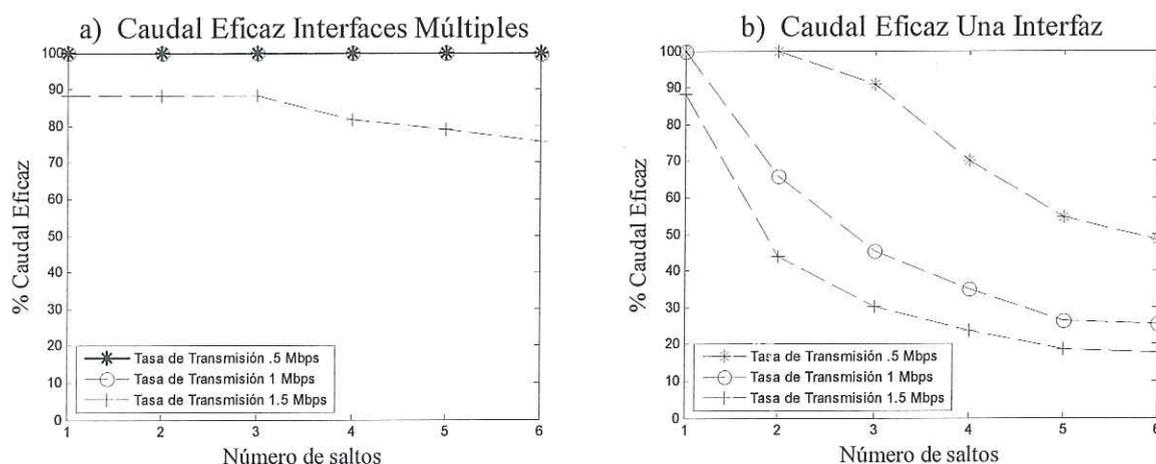


Figura 38. a) Caudal Eficaz interfaces múltiples, b) Caudal Eficaz una interfaz

En la figura 39 (a) y (b) se observa la gráfica de la pérdida de paquetes, estas graficas están en correspondencia con las de caudal eficaz. Para la arquitectura operando con dispositivos con múltiples interfaces se tiene una pérdida casi nula para velocidades de 0.5 y 1 Mbps y existe un efecto mínimo conforme se incrementa el número de saltos hacia el portal. En la figura 38 (b), se observa que cuando se incrementa el número de saltos

hacia el portal así como la tasa de transmisión, la pérdida de paquetes es mayor debido al hecho de que los nodos cuentan con una memoria (buffer) finita, donde se almacenan los paquetes antes de ser transmitidos, la cual se puede desbordar si la tasa de transmisión es lo suficientemente alta, tal que los paquetes de datos llenen rápidamente la memoria y al no haber espacio para almacenar mas paquetes algunos serán desechados, esta demora en el envío de paquetes se debe a que los nodos tienen que esperar a ganar el medio de transmisión.

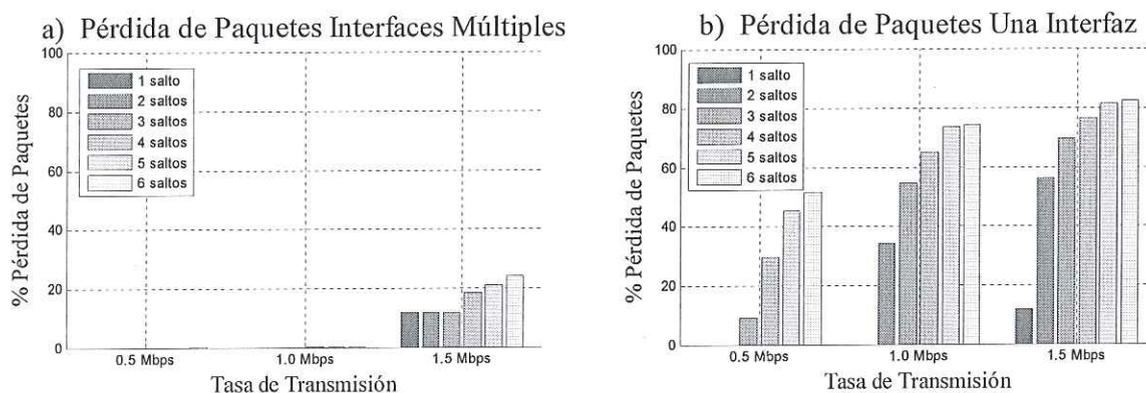


Figura 39. a) % Pérdida de Paquetes Interfaces Múltiples, b) % Pérdida de Paquetes Una Interfaz

En la figura 40 (a) se presenta el comportamiento del retardo utilizando interfaces múltiples, aquí se observa que el retardo se mantiene en un nivel estable para velocidades de 0.5 y 1 Mbps con un ligero incremento cuando el nodo se encuentra a mas de cuatro saltos alejado del portal, para la tasa de transmisión de 1.5 Mbps el retardo es mayor debido que los paquetes pasan un tiempo mayor en la memoria del nodo antes de ser transmitidos,

pero este retardo mantiene un comportamiento estable también con un ligero incremento a partir de cuatro saltos como para las velocidades de 0.5 y 1 Mbps. Por otro lado en la figura 39 (b) se presenta el comportamiento utilizando dispositivos con una sola interfaz de radio y un mismo canal, aquí se puede ver como el retardo se incrementa de manera considerable con el incremento en el número de saltos hacia el portal, así como con el aumento de la tasa de transmisión, este aumento en el retardo se debe principalmente a las mismas limitaciones mencionadas en las graficas 38 (b) y 39 (b), es decir, debido a memoria y contienda por acceso al medio.

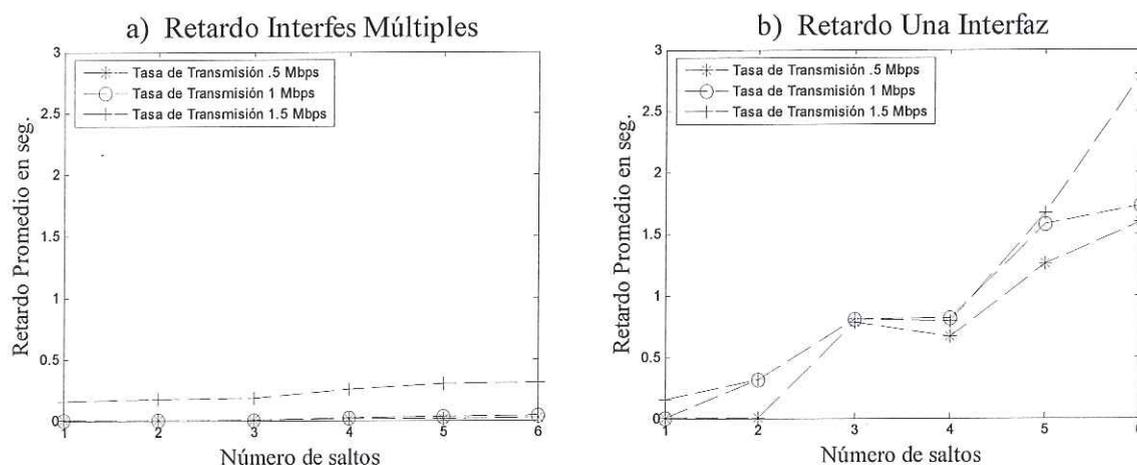


Figura 40. a) Retardo Interfaces Múltiples, b) Retardo Una Interfaz

En la figura 41 (a), se observa que la variación en el retardo para la arquitectura con dispositivos utilizando interfaces múltiples, se mantiene en un nivel bajo y estable con un ligero incremento cuando el nodo transmisor se aleja a más de cuatro saltos del nodo portal.

Por otro lado en la figura 41 (b) se presentan el comportamiento de la variación del retardo en una arquitectura con dispositivos operando con una sola interfaz, en ésta se observa como la variación del retardo se incrementa considerablemente a partir de dos saltos y sigue incrementándose conforme se incrementa el número de saltos así como la tasa de transmisión. Este comportamiento se debe igualmente a las limitaciones de memoria y acceso al medio de transmisión.

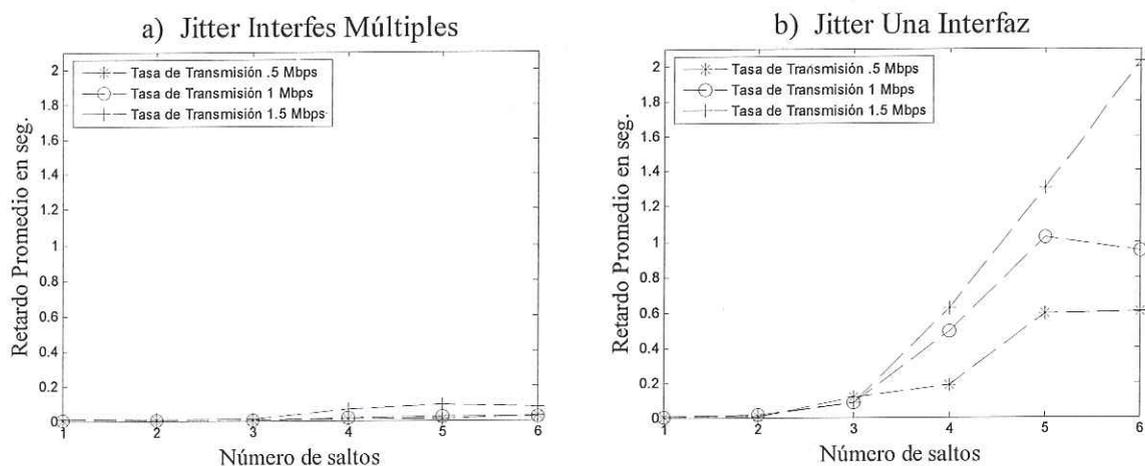


Figura 41. a) Jitter Interfaces Múltiples, b) Jitter Una Interfaz

Estos resultados justifican el uso de nodos con interfaces múltiples operando en diferentes canales para extender el área de cobertura de una red inalámbrica de forma

eficiente, ya que, como podemos observar, en este sencillo escenario en el que sólo tenemos un nodo buscando establecer comunicación con otro de la red cableada, la arquitectura propuesta obtiene mejores resultados en comparación con la arquitectura que sólo utiliza una interfaz con un único canal de comunicación.

En la tabla 3 se muestra un resumen de la comparación de los resultados obtenidos en las graficas anteriores, el nodo móvil se ubica a seis saltos del portal de acceso y transmite a 0.5, 1, 1.5 Mbps.

Tabla III. Comparación del Escenario1 con el nodo móvil a seis saltos del portal

Tasa de Tx.	Métricas	Nodos con una Interfaz	Nodos con Interfaces Múltiples
0.5 Mbps	Pérdida de Paquetes %	51.57273919	0.172018349
1 Mbps	Pérdida de Paquetes %	74.40917469	0.37681753
1.5 Mbps	Pérdida de Paquetes %	82.43951723	24.23952815
0.5 Mbps	Caudal Eficaz %	48.42726081	99.82798165
1 Mbps	Caudal Eficaz %	25.59082531	99.62318247
1.5 Mbps	Caudal Eficaz %	17.56048277	75.76047185
0.5 Mbps	Retardo Promedio Seg.	1.59731	0.0199803
1 Mbps	Retardo Promedio Seg.	1.72662	0.0423717
1.5 Mbps	Retardo Promedio Seg.	2.80285	0.307561
0.5 Mbps	Jitter Promedio Seg.	0.602929	0.0277776
1 Mbps	Jitter Promedio Seg.	0.945093	0.0233337
1.5 Mbps	Jitter Promedio Seg.	2.02533	0.0778135

Conforme aumenta el número de nodos móviles transmitiendo dentro de la red que cuenta con dispositivos operando con una sola interfaz y un canal común, la comparación

se vuelve un tanto absurda, es bastante obvio que está en desventaja en recursos físicos. Por lo tanto, no se presentan más comparaciones de este tipo. Por otra parte, podemos evaluar el desempeño del protocolo en diferentes escenarios y modificando algunos parámetros de simulación, como se describe a continuación.

IV.6.2 Escenarios 2 y 3

El segundo y tercer escenario que se propone evaluar el desempeño del protocolo variando el número de nodos móviles: 5, 10, 15 y 20, así como el número de nodos malla 4 y 6. Todos los escenarios tienen en común los siguientes dispositivos: Un portal de acceso y dos nodos en la red cableada. La topología es un área rectangular de 500 x 500 metros para el escenario 2 y de 800 x 500 metros. para el escenario 3; con un tiempo total de simulación de 500 segundos. La posición de los nodos móviles se define en forma aleatoria; en este escenario los nodos móviles establecen sesiones de comunicación con una duración de 100 segundos. Todas estas conexiones son realizadas hacia los nodos de red cableada. Los nodos móviles se mueven a una velocidad promedio de 1 m/s, 2m/s, 3m/s y 4 m/s de acuerdo con el algoritmo de movilidad "*random waypoint*" [Jonson et al., 1996]. La representación gráfica del escenario 2 y 3 para 20 nodos, se muestra en las figura 42 y 43

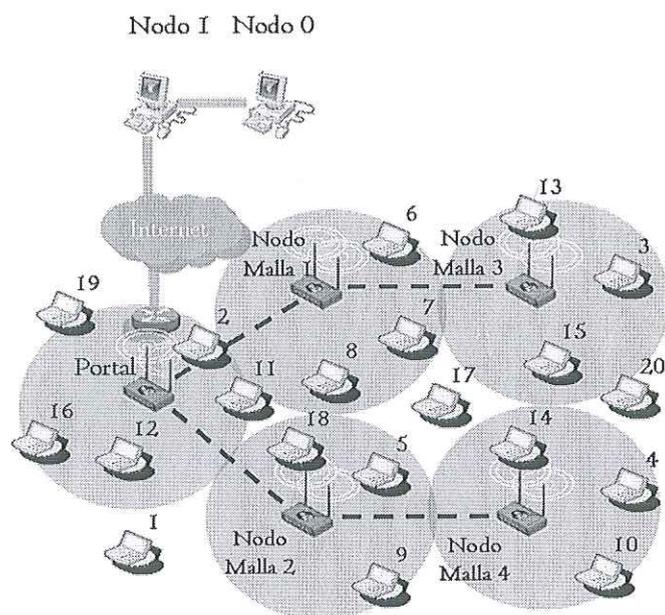


Figura 42. Escenario 2 con 4 nodos malla con un área de cobertura de 500 x 500 mts.

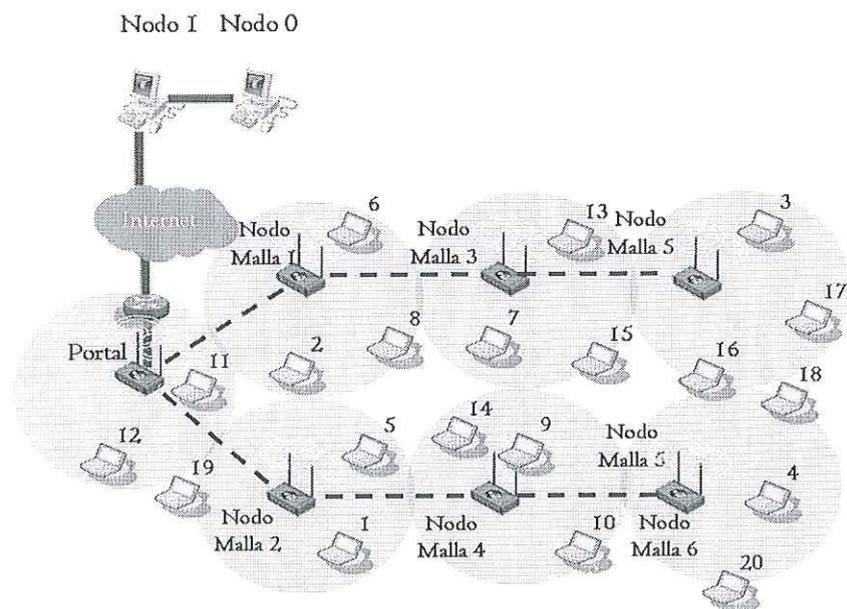


Figura 43. Escenario 3 con 6 nodos malla con un área de cobertura de 800 x 500 metros.

En la tabla IV se muestran los parámetros utilizados en los escenarios 2 y 3 donde, podemos observar que la tasa de transmisión de los nodos móviles se establece a 64kbps, también vemos que la Velocidad Promedio es de 1, 2, 3 y 4 m/s, ya que en este escenario lo que se quiere comparar es el comportamiento conforme se incrementa la velocidad y el número de nodos transmitiendo.

Tabla IV. Parámetros de los Escenarios 2 y 3.

Parámetro	Valor
Protocolo de Transporte	UDP
Tipo de Tráfico	CBR
Tamaño de Paquete	512
Protocolo de Enrutamiento	AODV
Control de Acceso al Medio	CSMA/CA
Modelo de Canal Radio	Dos-Rayos
Tasa Máx. de Transmisión	2 Mbps
Rango de TX Nodos Malla	250 m.
Rango de TX Nodos Móviles	150 m.
No. Interfaces Nodos Móviles	1
No. Interfaces Nodos Malla	3
Número de Canales	5
Modulación	DSSS
Tiempo de Simulación	500 s
Tamaño de Máx. Topología	800 X 500 m
No. Nodos Móviles	5,10,15,20
No. Nodos Malla	4 y 6
No. Portales	1
Tasa de Transmisión	64 kbps.
Velocidad Promedio	1,2,3,4 m/s

IV.6.2.1 Resultados de Simulación Escenario 2 y 3

En la figura 44 (a) en la grafica se observa que el caudal eficaz es afectado por el número de nodos transmitiendo simultáneamente, ya que, a partir de 10 y hasta llegar a 20 nodos transmitiendo el caudal eficaz se degrada, se puede ver que con 20 nodos transmitiendo se obtiene un 85 % del caudal eficaz y se observa que la velocidad con la que se mueven los nodos no afecta considerablemente el comportamiento del caudal eficaz.

Por otro lado en la figura 44 (b), se tiene un escenario con una área de cobertura mayor por lo tanto los nodos móviles tienen mayor área geográfica donde moverse. El caudal eficaz se ve afectado por la velocidad con la que se mueven los nodos ya que estos pierden las conexiones previamente establecidas y al perder la ruta tienen que realizar una nueva solicitud y debido a que el trafico que se transmite es constante los paquetes de datos se pierden cuando no se tiene una ruta validad para llegar al destino. Se puede ver también que a menor velocidad es decir a 1,2 y 3 m/s el caudal eficaz se mantiene por arriba del 95%, un 10% mejor en comparación con el escenario 2.

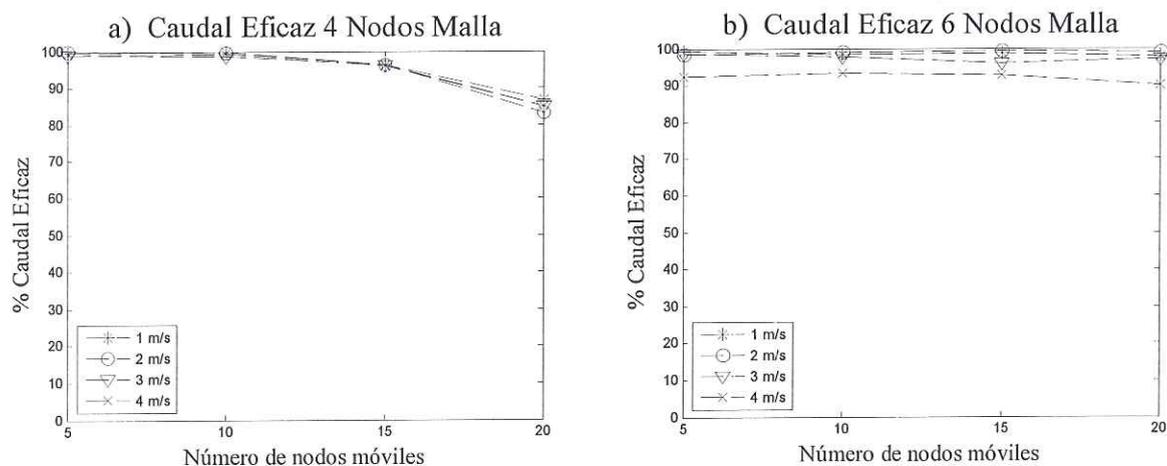


Figura 44. a) Caudal Eficaz escenario 2, b) Caudal Eficaz escenario 3

En la figura 45 a) se muestra la pérdida de paquetes para el escenario que cuenta con 4 nodos malla transmitiendo, se puede ver como la pérdida de paquetes depende del número de nodos transmitiendo en correspondencia con el caudal eficaz mostrado en la grafica 44 (a).

Por otro lado en la figura 45 (b), la causa principal de pérdida de paquetes se debe a la velocidad con la que se mueven los nodos, ya que a velocidades menores a 4 m/s la pérdida de paquetes es menor debido que las conexiones establecidas tienen una mayor duración, es decir el nodo móvil permanece más tiempo dentro del área de cobertura del nodo intermedio a través del cual llega al nodo destino.

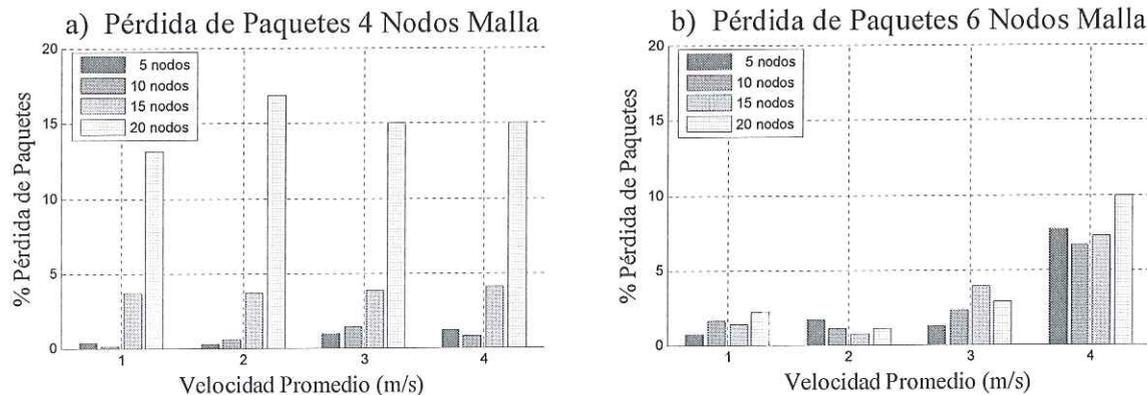


Figura 45. a) Pérdida de paquetes escenario 2, b) Pérdida de Paquetes escenario 3

En la figura 46 (a) y (b), se observa que el retardo aumenta cuando existe mayor número de nodos transmitiendo, por otra parte se ve claramente que al tener una mayor área geográfica de cobertura, se tiene menor número de nodos por unidad de área, por lo tanto existe menor interferencia y contienda debido que los nodos móviles transmiten por el mismo canal. Así que el retardo disminuye al aumentar el área de cobertura y el número de nodos malla.

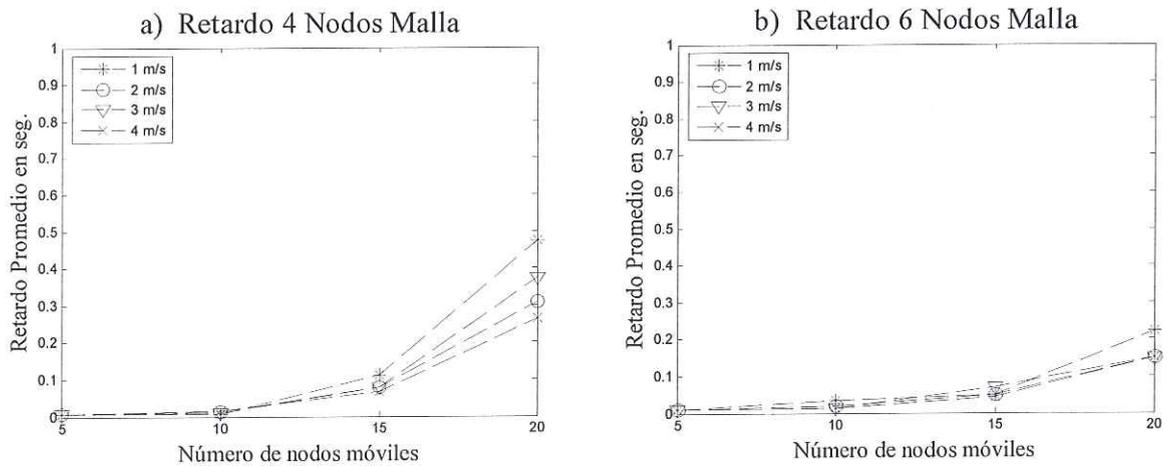


Figura 46. a) Retardo escenario 2, b) Retardo escenario 3.

En la figura 47 (a) y (b), se muestra la gráfica de la variación del retardo (*jitter*). Como se puede observar, cuando el número de nodos transmitiendo aumenta, la variación del retardo se incrementa, debido a que existe un mayor flujo de datos por la red; también se observa un incremento en la variación del retardo cuando la velocidad de los nodos aumenta ya que se pierden las conexiones establecidas previamente, por lo tanto, se incrementa la variación en el retardo con el que llegan los paquetes a su destino, éstas gráficas están muy relacionadas con las gráficas de la figura 46 que nos muestra el retardo promedio, ya que como se mencionó en la sección IV.5.4 el jitter se calcula tomando en cuenta las variaciones del retardo con la que llegan los diferentes paquetes. Por otra parte se observa que con 6 nodos malla el jitter es menor en comparación con el escenario 2, esto debido igualmente a que existe menor interferencia y contienda ya que los nodos móviles se encuentran mas alejados. Así que la variación del retardo disminuye al aumentar el área de cobertura y el número de nodos malla.

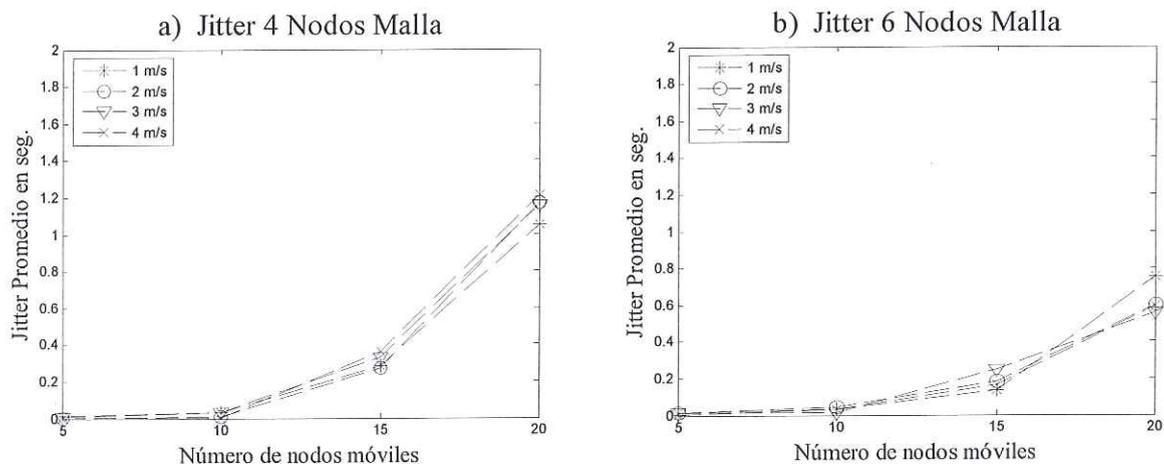


Figura 47. a) Jitter escenario 2, b) Jitter escenario 3

IV.7 RESUMEN

En este capítulo se presentó el entorno de simulación en el cual se trabajó para implementar el protocolo y la arquitectura propuesta; además, se establecieron los parámetros bajo las cuales se realizaron los experimentos. Se propusieron tres escenarios para evaluar el desempeño del mecanismo de enrutamiento: en el primero se realizó una comparación entre una topología con dispositivos con interfaces múltiples contra una topología con dispositivos con una sola interfaz; es clara la ventaja de operar con nodos con más de una interfaz de radio. En el segundo y tercer escenario se evaluó el desempeño general de la red, variando el número de nodos móviles y nodos malla, así como la velocidad con la que éstos se mueven. Por último, se realizó el análisis de las métricas de desempeño obtenidas.

V CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

V.1 CONCLUSIONES

Para atender la necesidad de aprovechar los recursos físicos (*hardware*) cada vez mas abundantes en nuestro entorno cotidiano, en este trabajo de tesis se propuso un mecanismo de configuración de una arquitectura denominada de tipo malla, con el cual se logra extender el área de cobertura de una red inalámbrica de una manera eficiente. También se realizó la adaptación del protocolo AODV, primero para que el protocolo fuera compatible con la arquitectura propuesta y después se buscó que los nodos inalámbricos pudieran establecer comunicación con la red cableada (Internet). Para resolver este problema se utilizaron características del trabajo realizado por Hamidian (2003).

A partir de las simulaciones realizadas, se obtuvieron las siguientes conclusiones.

En el primer escenario de simulación presentado en este documento, se mostró que la arquitectura propuesta es ampliamente superior a las redes que se componen de dispositivos con una sola interfaz. Se presentó el caso más sencillo, ya que la comparación

no es muy justa debido a que las redes de tipo malla cuentan con más recursos físicos. En las gráficas de caudal eficaz, pérdida de paquetes, retardo y variación en el retardo para redes operando con dispositivos con interfaces múltiples se puede observar claramente que el incremento en el número de saltos no afecta de manera considerable las métricas de desempeño ya que estas se mantienen muy parecidas a las medidas a un salto del portal de acceso.

En el segundo y tercer escenario de simulación se evaluó el desempeño del protocolo implementado, variando el número de nodos móviles que la componen, así como su velocidad. Es muy importante notar cómo teniendo una mayor área de cobertura y nodos moviéndose a velocidades iguales o superiores a 4m/s, impacta de manera considerable en el desempeño de las métricas de caudal eficaz, pérdida de paquetes, retardo y variación en el retardo, esto debido a que los nodos móviles pueden salir del área de cobertura y perder la conexión previamente establecida. Por otro lado teniendo nodos estáticos o con mínima movilidad se mantiene una buena calidad en las métricas de desempeño, ya que se mantienen por un tiempo mayor las conexiones establecidas inicialmente.

V.2 APORTACIONES

Como primera aportación, se tiene un mecanismo para realizar la configuración de canales de nodos que cuenten con interfaces múltiples, para lo cual se agregaron tres

nuevos mensajes de control (CONF1, CONF2, CONF3) al protocolo AODV con la finalidad de extender el área de cobertura de la red inalámbrica de manera eficiente, debido a que se cuenta con canales e interfaces múltiples no interferentes con lo cual se evita la contienda por el acceso al medio inalámbrico.

Como segunda aportación, se tienen las extensiones de funcionalidad de los mensajes RREQ_E y RREP_E del protocolo AODV, ya que se agregaron nuevos campos para identificar correctamente el canal y la interfaz por la cual debe ser encaminado un paquete hasta llegar a su destino. Se trabajó en lograr que los nodos móviles dentro de la red inalámbrica tuvieran acceso a Internet, esto basado en la propuesta de Hamidian (2003), pero adaptándola a nuestro escenario con las extensiones en los mensajes RREQ_E y RREP_E mencionadas en el capítulo III.

La tercera aportación en la realización de este proyecto, fue la evaluación del desempeño del mecanismo de enrutamiento propuesto, para lo cual se diseñaron escenarios donde se analizó el comportamiento bajo diferentes condiciones. Los resultados obtenidos muestran las ventajas que se tienen con este tipo de arquitecturas, como las limitaciones que se presentan al implementar este mecanismo en escenarios de alta movilidad.

Como cuarta aportación se tiene que en este proyecto de tesis se trabajó ampliamente en extender las funcionalidades del simulador NS-2 ya que éste no considera en su versión original el trabajar con nodos que implementen múltiples interfaces; finalmente, se integraron todas estas extensiones al simulador para poder realizar las simulaciones de este trabajo.

V.3 TRABAJO FUTURO

Como trabajo futuro se propone integrar mecanismos que permita realizar balanceo de carga, para evitar la saturación de rutas hacia los diferentes destinos, permitiendo mejorar el rendimiento de la red y reflejándose en la calidad de servicio ofrecida al usuario final. También se propone realizar el análisis de escenarios donde se cuente con múltiples portales de acceso a Internet; para lo cual se requerirá de un algoritmo que elija de forma eficiente al nodo portal y cómo conmutar entre éstos. Otra mejora que se propone es que los nodos malla sean capaces de otorgar la ruta por default automáticamente cada vez que un nodo móvil realice una solicitud de ruta. Por otro lado, se plantea también la evaluación del mecanismo propuesto en esta tesis con el uso de WiMAX, ya que esta tecnología ofrece una mayor tasa de transmisión, se incrementarían aún más las aplicaciones de este tipo de arquitecturas.

Probar el protocolo con un canal de radio más parecido a la realidad, en donde, se consideren pérdidas de bits debido a ruido, desvanecimientos e interferencia, ya que no se consideró esto en las simulaciones. Por último se propone la implementación y evaluación de este trabajo con dispositivos reales.

REFERENCIAS

Altman E., Jiménez T., 2003 **“NS Simulator for beginners”** Lecture notes, Univ. de los Andes, Mérida, Venezuela and ESSI, Sophie-Antipolis, France, 142pp.

Akyildiz I., Wang X., Wang W., 2005 **“Wireless mesh networks: a survey”** Computer Networks, ELSEVIER, 43pp.

Cha, Hyun-Wook., Park, Jung-Soo y Kim Hyoung-Jun. 2004 **”Support of Internet Connectivity for AODV”** Internet Draft \draft-cha-manet-AODV-internet-00, Enero 2007.

Clausen, T. y Jacquet, P. 2003. **“Optimized Link State Routing Protocol”**. RFC 3626. IETF <http://www.faqs.org/rfcs/rfc3626/>. Enero 2007.

Benzaid, M.; Minet, P. y Al A. K. 2003. **“Analysis and Simulation of Fast-OLSR”**, The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, Jeju, Korea, Abril 2003; 3:1788-1792 pp.

Damle, A., Rajan, D., Faccin S., 2006 **“Hybrid Routing with Periodic Updates (HRPU) in Wireless Mesh Networks”**, IEEE Communications 1:318-324 pp.

Deitel H., Deitel P., 2005 **“How to Program C/C++”**, 5/e., Edit. Prentice Hall, 1536 pp.

Faccini S., Wijting C., Knecht J. 2006 **“Mesh WLAN Networks: Concept and System Design”**, IEEE Wireless Communications 13:10-17 pp.

Fall K., Varadhan K. 2007 **"The ns manual"** VINT project. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Agosto 2007.

Gast M., 2002 **"802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide"** O'Reilly & Associates, 630pp.

Hamidian, A. 2003 **"A Study of Internet Connectivity for Mobile Ad Hoc Networks in NS-2"**, Master's Thesis Lund Institute of Technology, <http://www.telecom.lth.se/Personal/alexh/>, Enero 2007.

Hamed M., Wong V., 2006 **"Logical Topology Desing and Interface Assignment for Multi-Channel Wireless Mesh Networks"**, Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM '06. IEEE;1-6pp. San Francisco, CA, USA.

Jelger C., Frey N. y Frey A., 2003 **"Gateway and address autoconfiguration for IPv6 adhoc networks"**, <http://lsiit.u-strasbg.fr/Publications/2003/JN03b/>, Enero 2007

Johnson, D., Maltz D. y Hu Y., 2003. **The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)**. IETF MANET Working Group draft-ietf-manet-dsr-09.txt <http://www3.ietf.org/proceedings/03jul/I-D/draft-ietf-manet-dsr-09.txt>, Febrero 2007.

Lee M., Zheng J., Ko Y., Shrestha D., 2006 **"Emerging Standard For Wireless Mesh Technology"** IEEE Wireless Communications 13: 56-63p.

McCanne S., Floyd S. **"ns Networks Simulator"**.<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, Noviembre 2006.

Mohapatra P., Krishnamurthy S., 2005 **“AD HOC Networks Technologies and Protocols”**, Springer Science Inc., 270pp.

Perkins, C. E. y Belding-Royer, E. 2003. **“Ad Hoc On Demand Distance Vector Routing”** RFC 3651. <http://www.ietf.org/rfc/rfc/3561.txt>, Enero 2007.

Pirzada A., Portmann M., Indulska J., 2006. **“Evaluation of Multi-Radio Extensions to AODV for Wireless Mesh Networks”**, International Workshop on Mobility Management and Wireless Access, Malaga, España, Octubre 2006.

Ramachandran K., Buddhikot M., Chandranmenon G., 2005 **“On the Design and Implementation of Infrastructure Mesh Networks”**, First IEEE Communications Society’s Workshop on Wireless Mesh Networks (WiMesh 2005). Santa Clara, CA. USA. Septiembre 2005.

Raniwala A., Chiueh T., 2005. **“Architecture and Algorithms for an IEEE 802.11-Based Multi-Channel Wireless Mesh Networks”**, Appears in proceedings of IEEE Infocom’05. <http://www.cse.msu.edu/~wangbo1/ns2/nshowto8.html>, Noviembre 2006

So J., Vaidya N., 2006 **“Load-Balancing Routing in Multichannel Hybrid Wireless Networks With Single Network Interface”** IEEE Transactions on Vehicular Technology, 55 (3): 806-812pp.

Toh, C.K. 2002. **“Ad hoc móviles Networks: Protocols and Systems”** Prentice Hall Inc.N.J.302 pp.

Tanenbaum, A. S. 2003. **“Redes de Computadoras”** 4ta. Edición Pearson Prentice Hall, México D.F. 891 pp.

Wakikawa R., Malinen J., Perkins C, Nilsson A. y Tuominen A. 2003. “**Global Connectivity for IPv6 Mobile Ad Hoc Networks**”. Internet Draft \draftwakikawa-manet-globalv6-03, Enero 2007

Zakon R., 2006 “**Internet Timeline**”, <http://www.zakon.org/robert/internet/timeline/>
Febrero 2007.

Anexo 1

Modelos de Propagación de Radio en NS

En este apéndice se describen los modelos de propagación de radio implementados en NS. Estos modelos se usan para predecir la potencia de la señal recibida en cada paquete. En la capa física de cada nodo hay un umbral de recepción. Cuando un paquete es recibido, si la potencia de la señal está por debajo del umbral de recepción, el paquete es marcado como erróneo y es desechado por la capa MAC.

Existen tres modelos de propagación en NS: modelo de espacio libre, modelo de reflexión de dos rayos y el modelo de sombreo.

A.1 Modelo de Espacio Libre (Free Space)

El modelo de propagación de Espacio Libre supone condiciones de propagación ideales donde existe solo una trayectoria de visibilidad entre transmisor y receptor. Friis presentó la siguiente ecuación para calcular la potencia recibida en el espacio libre en una distancia d desde el transmisor.

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (5)$$

Donde P_t es la potencia de la señal transmitida. G_t y G_r son las ganancias de las antenas del transmisor y del receptor. L ($L \geq 1$) es la pérdida del sistema y λ es la longitud de onda. Es común seleccionar a $G_t = G_r$ y $L = 1$ en simulaciones de NS.

El modelo de espacio libre, básicamente representa al intervalo de comunicación como un círculo alrededor del transmisor, si el receptor está dentro del círculo recibe el paquete, de otra manera todos los paquetes se pierden.

Simulación

Se propone un escenario donde se tienen dos nodos, un nodo envía información a otro, el nodo que recibe la información se aleja del nodo transmisor y se evalúa el valor de la tasa de paquetes entregados PDR (Packet Delivery Ratio) contra la distancia en metros entre los nodos.

El PDR se define como el número de paquetes que se reciben entre el número de paquetes que se envían, y su valor está dado en porcentaje. Se envían un total de 800 paquetes a una tasa de 2 Mbps, en un tiempo de simulación de 100 segundos.

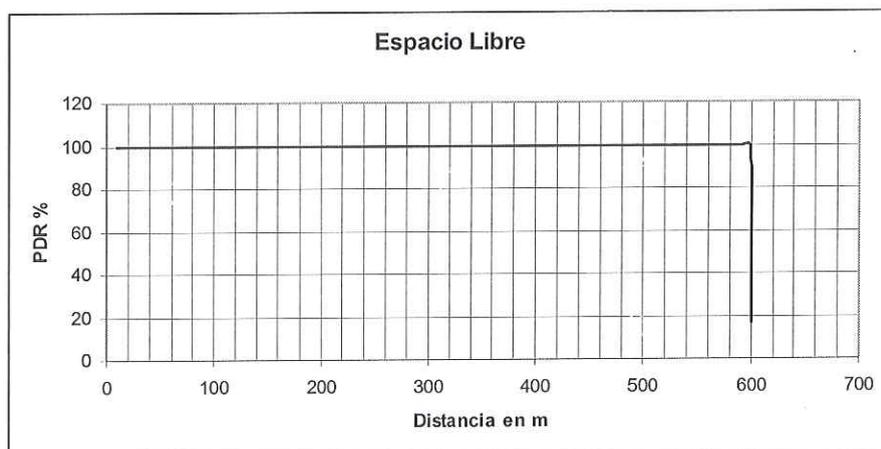


Figura 1. Comportamiento del PDR con respecto a la distancia en el modelo de espacio libre

La figura 1 muestra que mientras el valor de la potencia recibida esté por encima del umbral, todos los paquetes serán marcados como válidos, manteniéndose el PDR constante hasta cuando la distancia excede del límite puesto, que en este caso es de 600 m.

A.2 Modelo de 2 rayos (Two-Ray Ground Reflection)

Un solo trayecto de visibilidad entre dos nodos móviles, raramente es el único medio de propagación. El modelo de 2 rayos considera la trayectoria de visibilidad y la trayectoria de reflexión en tierra. Este modelo entrega una predicción más exacta en distancias largas que el modelo de espacio libre. La potencia recibida en una distancia d es:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L} \quad (6)$$

Donde h_t y h_r son las alturas de las antenas del transmisor y receptor.

La ecuación (2) muestra un decaimiento de la potencia más rápido que la ecuación (1) conforme la distancia se incrementa. Sin embargo, el modelo de 2 rayos no entrega buenos resultados para distancias cortas debido a la oscilación causada por la combinación destructiva y constructiva de los dos rayos. En cambio, el modelo de Espacio Libre se sigue usando para casos donde la d es pequeña.

Por consiguiente, se calcula una distancia d_c llamada cross-over para este modelo. Cuando $d < d_c$ se usa la ecuación (1). Cuando $d > d_c$ se usa la ecuación (2). En la distancia cross-over, es decir cuando $d = d_c$, ambas ecuaciones entregan el mismo resultado. Entonces d_c se calcula de la siguiente manera.

$$d_c = \frac{(4\pi h_t h_r)}{\lambda} \quad (7)$$

Simulación

Igual que en el modelo anterior, se propone un escenario de dos nodos donde un nodo envía información a otro, el nodo que recibe el tráfico se aleja del nodo transmisor. Tal como en el caso anterior se grafica el PDR contra la distancia entre nodos.

Se envían un total de 800 paquetes a una tasa de 2 Mbps, en un tiempo de simulación de 100 segundos.

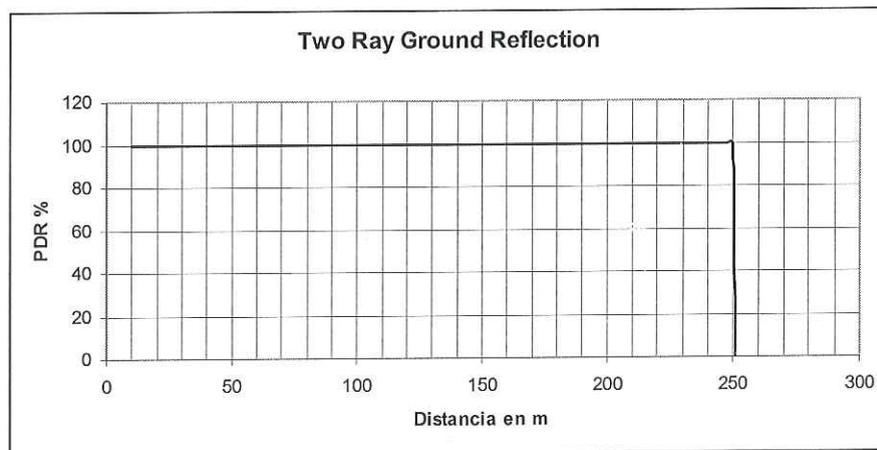


Figura 2. Comportamiento del PDR con respecto a la distancia en el modelo de 2 rayos

La figura 2 muestra el comportamiento de la tasa de entrega de paquetes, se puede observar que esta respuesta es muy parecida a la respuesta obtenida con el modelo de

espacio libre. Al igual que en el modelo de Espacio Libre, mientras la potencia de recepción esté por encima del umbral se recibirán todos los paquetes, sin embargo este modelo hace un cálculo más exacto de la potencia que se recibe, podemos ver en este ejemplo que después de 250 m el valor de la potencia está por debajo del umbral y todos los paquetes se pierden

A.3 Modelo de sombreado (Shadowing)

El modelo de Espacio Libre y el modelo de 2 rayos predicen la potencia recibida como una función determinística de la distancia. Ellos representan el rango de comunicación como un círculo ideal. En realidad, la potencia recibida en cierta distancia es una variable aleatoria debido a los efectos de la propagación multitrayectoria, también conocida como efecto de desvanecimiento. Los modelos anteriores predicen la potencia media recibida en una distancia d . Un modelo más general y amplio es llamado modelo de sombreado. Este modelo se usa para exteriores (celulares) y no considera propagación multitrayectoria.

El modelo de sombreado consiste en dos partes. La primera es conocida como modelo de pérdida de trayecto, el cual predice la potencia media recibida en una distancia d ,

denotada por $\overline{P_r(d)}$. Utiliza una distancia d_0 como referencia. $\overline{P_r(d)}$ se calcula en relación a $P_r(d_0)$ como se ve

$$\frac{P_r(d_0)}{\overline{P_r(d)}} = \left(\frac{d}{d_0} \right)^\beta \quad (8)$$

A β se le conoce como el exponente de pérdida de trayectoria (path loss exponent) y es determinada empíricamente en medición de campo. De la ecuación 1 conocemos $\beta = 2$ para la propagación en espacio libre. $P_r(d)$ se calcula de la ecuación (1).

La pérdida de trayectoria se mide en dB. De la ecuación (4) tenemos

$$\left[\frac{\overline{P_r(d)}}{P_r(d_0)} \right]_{dB} = -10\beta \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (9)$$

La tabla I muestra algunos valores típicos de β . Los valores más grandes corresponden a más obstrucciones y a la disminución más rápida de la potencia promedio recibida conforme la distancia se incrementa.

Tabla I. Valores típicos de β

Ambiente		β
Al aire libre	Espacio Libre	2
	Área urbana sombreada	De 2.7 a 5
En edificios	Línea de Vista	De 1.6 a 1.8
	Obstrucción	De 4 a 6

La segunda parte del modelo refleja la variación de la potencia recibida en una cierta distancia. Es una variable aleatoria log-normal, esto es, que es una distribución Gaussiana expresada en dB's. El modelo completo se muestra a continuación.

$$\left[\frac{P_r(d)}{P_r(d_0)} \right]_{dB} = -10\beta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{dB} \quad (10)$$

donde X_{dB} es una variable aleatoria Gaussiana con media cero y variación estándar σ_{dB} . A la ecuación (6) también se le conoce como modelo de sombreado log-normal.

A σ_{dB} se le conoce como desviación de sombreado y al igual que β es obtenida por mediciones. La tabla 2 muestra algunos valores típicos de σ_{dB} .

Tabla II. Valores típicos de σ_{dB}

Ambiente	σ_{dB} (dB)
Aire libre	De 4 a 12
Oficina, muchas divisiones	7
Oficina, medianas particiones	9.6
Fábrica con línea de vista	De 3 a 6
Fábrica con obstrucciones	6.8

El modelo de sombreado extiende al modelo de círculo ideal a un modelo estadístico: los nodos solo pueden comunicarse probabilísticamente cuando están cerca del borde del intervalo de comunicación.

Simulación

Se elige el mismo escenario que en los modelos anteriores, se tienen dos nodos que están cerca y uno se aleja del otro, el nodo fijo envía tráfico al nodo que se aleja. A diferencia de los modelos anteriores, se debe de elegir un ambiente, para simular este modelo se eligieron 5 escenarios: aire libre, aire libre con poco sombreado, aire libre con sombreado por área urbana y aire libre con sombreado por área urbana con más sombreado.

1. Aire libre, se elige el valor de $\beta = 2$, $\sigma_{dB} = 4$. esto corresponde al Espacio libre.

Se envían un total de 800 paquetes a una tasa de 2Mbps en un tiempo de simulación de 100 segundos.

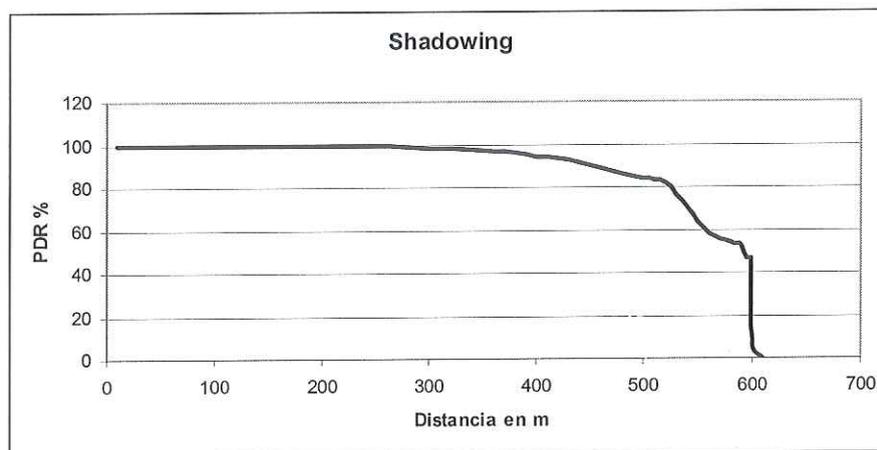


Figura 3. Comportamiento del PDR respecto a la distancia para una $\beta = 2$.

Cuando se tiene un valor de $\beta = 2$, es como si tuviéramos solo el espacio libre, de manera que podemos observar en la figura 3, a diferencia del modelo de Espacio Libre, el modelo de sombreado no trunca en un valor de umbral, sino que el PDR disminuye en proporción con la distancia.

En la figura 4 se muestra una comparación entre los modelos Espacio Libre y Sombreado, vemos claramente la diferencia entre ellos.

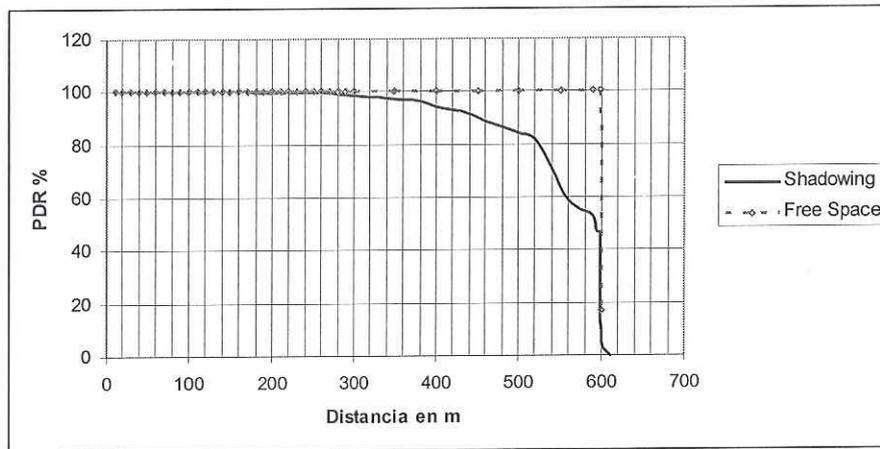


Figura 4. Comparación entre los modelos Espacio Libre y Sombreo

2. Aire libre, $\beta = 2.5$ y $\sigma_{dB} = 4$, se envían 800 paquetes.

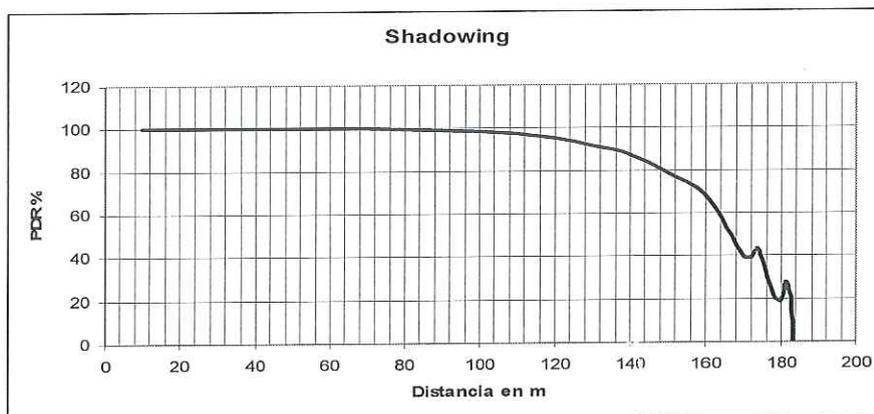


Figura 5. Respuesta del PDR respecto a la distancia, usando $\beta = 2.5$

3. Aire libre, $\beta = 2.75$ y $\sigma_{dB} = 4$. Área urbana, se envían 800 paquetes.

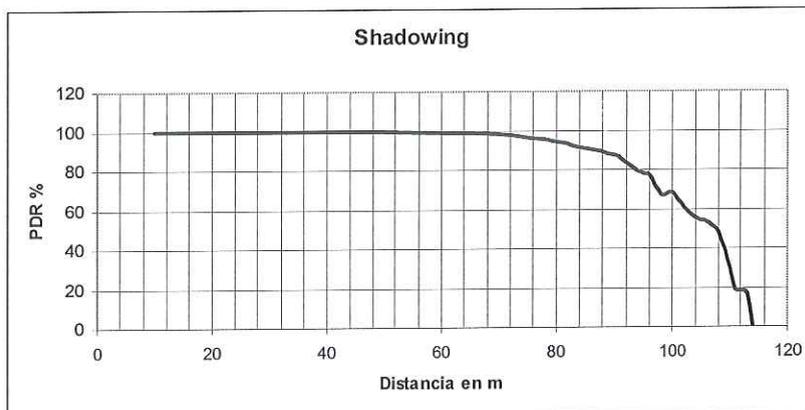


Figura 6. Respuesta del PDR respecto a la distancia, usando $\beta = 2.75$

4. Aire libre, $\beta = 3$ y $\sigma_{dB} = 4$. Área urbana, se envían 800 paquetes.

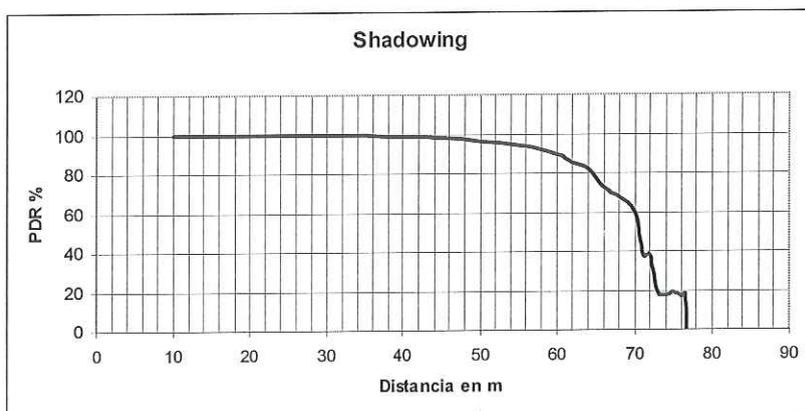


Figura 7. Respuesta del PDR respecto a la distancia, usando $\beta = 3$

5. Aire libre, $\beta = 3.25$ y $\sigma_{dB} = 4$. Área urbana, se envían 800 paquetes.

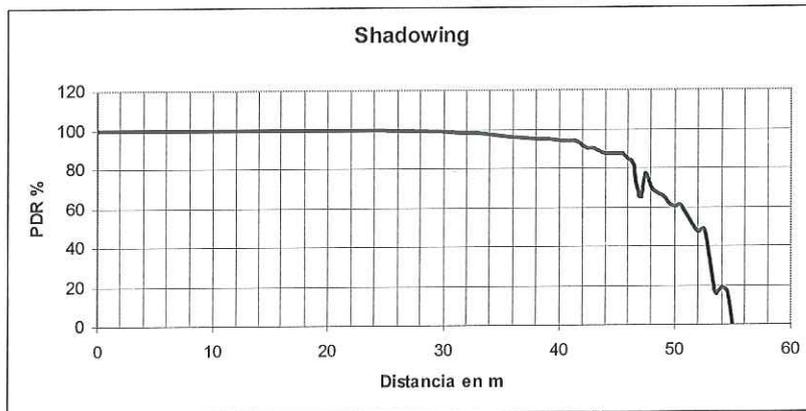


Figura 8. Respuesta del PDR respecto a la distancia, usando $\beta = 3.25$

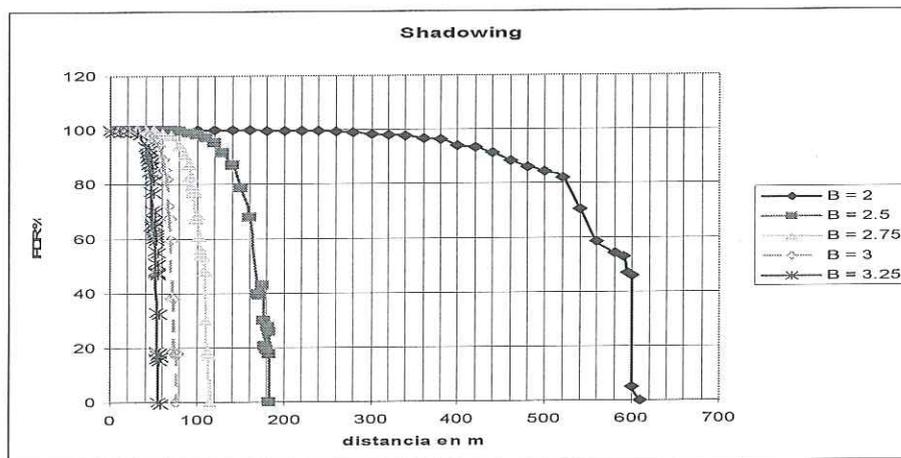


Figura 9. Gráfica que muestra el comportamiento del PDR con distintos valores de β

Conclusiones

El modelo de sombreado se apega más a la realidad que los modelos de dos rayos y el de espacio libre, se puede ver que mientras el PDR en los dos primeros se mantenía constante hasta llegar al umbral de la distancia, en el modelo de sombreado decae en proporción a la distancia.

También se observa en el modelo de sombreado, que al aumentar la β , el decaimiento es mayor y el alcance disminuye, esto tiene razón de ser pues si la β es muy grande significa que existe un obstáculo entre el nodo transmisor y el nodo receptor.