

TESIS DEFENDIDA POR
Ernesto Iván Sandoval García
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Luis Armando Villaseñor González
Director del Comité

Dr. Jaime Sanchez Garcia
Miembro del Comité

Dra. María Del Carmen Maya Sánchez
Miembro del Comité



Dr. José Rosario Gallardo López
Miembro del Comité

Dra. Ana Isabel Martínez García
Miembro del Comité

Dr. Luis Alejandro Márquez Martínez
*Coordinador del programa de posgrado
en ciencias en Electrónica y
Telecomunicaciones*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
*Encargado del Despacho de la
Dirección de Estudios de Posgrado*

16 de Noviembre de 2007

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



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

**MECANISMOS DE MULTI-DIFUSIÓN (MULTICAST) PARA REDES MÓVILES
HETEROGÉNEAS AD HOC**

TESIS

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

Presenta:

ERNESTO IVÁN SANDOVAL GARCÍA

Ensenada, Baja California, México, Noviembre de 2007.

RESUMEN de la tesis de **Ernesto Iván Sandoval García**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES. Ensenada, Baja California. Noviembre de 2007.

MECANISMOS DE MULTI-DIFUSIÓN (MULTICAST) PARA REDES MÓVILES HETEROGÉNEAS AD HOC

Resumen aprobado por:

Dr. Luis Armando Villaseñor González
Director de Tesis

El enrutamiento de multi-difusión se emplea siempre que se requiera que datos provenientes de una fuente, sean entregados a un grupo de receptores, de esta manera, la fuente transmite un flujo individual de paquetes de datos, los cuales son entregados posteriormente a un grupo de nodos receptores. Consecuentemente, los mecanismos de multi-difusión son ampliamente usados en redes de computacionales, como estas técnicas permiten que las aplicaciones sean capaces de ahorrar ancho de banda y reducir la carga de tráfico en la red. La estrategia de enrutamiento de multi-difusión es diferente al enrutamiento unicast y broadcast, mientras que en el enrutamiento unicast, la fuente envía información a un solo destinatario, por otra parte, el enrutamiento broadcast se utiliza para transmitir información hacia todos los miembros de la red. Existen muchas aplicaciones que se benefician con el empleo de multi-difusión, por ejemplo: videoconferencia, educación a distancia, Radio IP, TV IP, comunicación entre grupos, cotización de acciones, distribución de software, operaciones de rescate, noticias y aplicaciones militares.

En relación a los protocolos de multi-difusión, la mayoría de ellos se han diseñado para redes cableadas, tal como Internet; así mismo, algunos protocolos de multi-difusión se han diseñado para ambientes inalámbricos, como las redes inalámbricas Ad hoc, sin embargo estos protocolos se enfocan en la transmisión de tráfico dentro de la misma red inalámbrica y no tratan el problema relacionado con la interoperabilidad entre redes inalámbricas y redes cableadas.

Hoy en día, dispositivos móviles inalámbricos demandan una gran cantidad de servicios de Internet, resultando en la necesidad de extender algunos de estos servicios fácilmente disponibles hacia la red inalámbrica mientras se proporciona el mismo nivel de funcionamiento y confiabilidad.

Este proyecto presenta una estrategia para integrar a una red inalámbrica Ad hoc con una red cableada, incorporando la interoperabilidad de servicios de multi-difusión entre la red cableada y la red inalámbrica ad hoc. Consecuentemente, el tráfico de multi-difusión generado dentro de la red cableada pueda alcanzar a clientes ubicados en la red inalámbrica ad hoc.

Palabras clave: Mecanismos de multi-difusión, redes Ad hoc, redes heterogéneas, WLAN, interoperabilidad.

ABSTRACT of the thesis presented by **Ernesto Iván Sandoval García** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS. Ensenada, Baja California, Mexico. October 2007.

MULTICAST MECHANISMS FOR HETEROGENEOUS MOBILE AD HOC NETWORKS

Abstract approved by:

Dr. Luis Armando Villaseñor González
Thesis Supervisor

Multicast routing is employed whenever data needs to be delivered from a single source to a group of receivers, in this way, the source can transmit a single flow of data packets which are subsequently delivered to a group of receiver nodes. As a result, multicast routing protocols are extensively used in computer networks, as these techniques allow applications to be able to save bandwidth and reduce the traffic load in the network. The multicast routing approach is different from the unicast and broadcast routing; during unicast routing the source sends data to a single destination, on the other hand, broadcast routing is used to transmit information to all the members of the network. There are multiple applications that benefit from implementing multicast routing, for example: videoconference, remote education, IP radio, IP TV, group communication, stock market quotes, software distribution, rescue operations, news, and military applications.

In relation to multicast protocols, most of them have been designed for use in wired networks, such as the Internet; similarly, some multicast protocols have been proposed for wireless environments, like wireless ad hoc networks, however they usually deal with the transmission of multicast traffic within the wireless network and do not address those issues related to the interoperability between wired and wireless networks.

Nowadays, wireless mobile devices have a large demand of multiple services from the Internet, thus resulting in a need to extend some of the readily available services to wireless network while providing the same level of performance and reliability.

This work presents an approach to integrate a wireless ad hoc network with a wired network, while supporting the interoperability of multicast services between the wired network and the wireless ad hoc network. As a result, the multicast traffic generated within the wired network can reach clients located in the wireless ad hoc network.

Keywords: Multicasting Routing Protocols, Ad hoc networks, heterogeneous network, WLANs, interoperability.

Dedicatoria

...A mi padre Dios

...A toda mi familia.

... A mis queridos amigos

Agradecimientos

Gracias a Dios, por darme la capacidad de lograr las metas que me propongo.

Gracias a CONACYT, por la beca otorgada para la realización de los estudios.

Gracias a CICESE, por la beca de 3 meses otorgada para completar el proyecto.

Gracias a mis padres: Luz y Calo, porque siempre han creído en mí y siempre me han brindado su amor y apoyo incondicional.

Gracias a mis hermanos: Silvia, Mary, Jaime, Carlos, Pepe, Ariel, Mito, Lucy, Chica, Liza, Omar y Polo. Por apoyar mis proyectos y estar conmigo siempre.

Gracias a mi Director de Tesis: Dr. Luis Villaseñor, un gran maestro y amigo, que gracias a su gran conocimiento, consejos y regaños este proyecto llegó a su fin.

Gracias a mi comité de Tesis: Dr. Jaime Sánchez, Dra. Ana Martínez, Dr. Carmen Maya y Dr. José Gallardo. Por sus atinadas opiniones y consejos durante el periodo de investigación y desarrollo de Tesis.

Gracias a mis hermanos de Ensenada: Dania y Andrés, los mejores amigos que pude conseguir, los quiero mucho.

Gracias a mis hermanos GCI: Javo, Richard, Edna, Jorge, Rubén y Lennin. Por tantos y tantos buenos momentos.

Gracias al Dr. David Covarrubias, por sus consejos y recomendaciones, excelente maestro y amigo.

Gracias al Dr. Arturo Velásquez y el Dr. Roberto Conte, por sus comentarios y apoyo otorgado.

Gracias a mi roommate Mario, a pesar de las diferencias, un gran amigo.

Gracias a mis Amigos: Lupita, Marco, Kobe, Sergio, Tuzo, Beto, Danyboy, Daniel, Aldo, Varun, Sarai, Erika, Ale Mina, Ale Urbina, Augusto, Ely, Silvia, Horacio, Armando, Ramón Muraoka, por su compañía, carrilla y amistad brindada, así como gracias a todos mis otros compañeros de CICESE

Gracias a la Familia Stuart: Alberto, Rossy y Kristal, por el cariño que me brindaron y por ser mi familia adoptiva en Ensenada.

Contenido

Página

I	INTRODUCCIÓN	1
I.1	Motivación	4
I.2	Planteamiento del problema	4
I.3	Objetivo de la tesis	6
I.4	Infraestructura	7
I.5	Estructura del trabajo	8
II	MULTI-DIFUSIÓN IP	10
II.1	Introducción	10
II.2	Concepto de grupo de multi-difusión.	11
II.3	Protocolo de Administración de Grupos de Internet (IGMP)	12
II.4	Mensaje IGMP	12
II.4.1	IGMP versión 1	12
II.4.2	IGMP versión 2	13
II.5	Árboles de distribución para multi-difusión.	14
II.5.1	Árboles fuente.	14
II.5.2	Árboles compartidos.	16
II.6	Propagación Multicast.	17
II.6.1	Propagación por la Trayectoria Inversa (RPF)	18
II.7	Protocolo de Multi-difusión Independiente (PIM)	18
II.7.1	PIM Modo Denso	18
II.7.2	PIM Modo Disperso	19
II.8	DVRMP	21
III	MECANISMOS DE MULTI-DIFUSIÓN PARA REDES AD HOC	24
III.1	Introducción	24
III.2	Clasificación de los protocolos de multi-difusión para redes ad hoc	25
III.2.1	Tratando con la dinámica del grupo de multi-difusión	26
III.2.2	Tratando con la dinámica de la red	26
III.2.2.1	Técnica 1: Dependencia de más nodos	26
III.2.2.2	Técnica 2: Dependencia de pocos nodos	27
III.2.2.3	Técnica 3: Dependencia de nodos más estables	27
III.2.2.4	Técnica 4: Dependencia en una capa de apoyo	28
III.3	Mecanismos de multi-difusión	28
III.3.1	Mecanismos basados en árbol	29
III.3.2	Mecanismos basados en malla	30
III.3.3	Mecanismos basados en estructura de dorsal	31
III.3.4	Multi-difusión sin estado	32
III.3.5	Mecanismos de multi-difusión sobrepuesta	33

Contenido (continuación)

	Página
III.3.6 Mecanismos de multi-difusión por ubicación asistida	34
III.3.7 Mecanismos basados en Gossip	35
III.3.8 Mecanismos híbridos.	36
III.4 Parámetros de una red ad hoc.	36
III.4.1 Tamaño de la red	36
III.4.2 Movilidad en la red.....	37
III.4.3 Tamaño de grupo de multi-difusión.....	38
III.5 Resumen.....	39
IV MAODV.....	41
IV.1 Introducción.....	41
IV.2 Principio de operación de MAODV	42
IV.3 Tablas de enrutamiento.....	44
IV.4 Terminología MAODV.....	46
IV.5 Formato de los mensajes de control en MAODV.....	49
IV.5.1 Formato del mensaje de petición de ruta (RREQ)	49
IV.5.2 Formato del mensaje de respuesta de ruta (RREP)	51
IV.5.3 Formato del mensaje de activación de multi-difusión (MACT).	52
IV.5.4 Formato del mensaje de Hola de grupo (GRPH).....	54
IV.6 Descripción general del funcionamiento del MAODV.	55
IV.6.1 Uniéndose a un grupo de multi-difusión.....	56
IV.6.2 Difusión del tráfico a través del árbol de multi-difusión.....	57
IV.6.3 Revocación de la membresía.	58
IV.6.4 Mantenimiento del árbol de multi-difusión.	58
IV.6.5 Propagación periódica del mensaje hola de grupo (GRPH).	59
IV.6.6 Selección de nuevo líder de grupo.....	60
IV.7 Resumen.....	61
V INTEROPERABILIDAD ENTRE MAODV Y DVMP.....	62
V.1 Introducción.....	62
V.2 Consideraciones.....	62
V.3 Enrutador de Frontera	63
V.4 Funcionamiento del mecanismo de interoperabilidad	64
V.4.1 Interoperabilidad en la parte cableada	64
V.4.2 Interoperabilidad en la parte inalámbrica	66
V.4.3 Proceso de revocación de membresía	70
V.5 Resumen.....	73
VI SIMULACIÓN Y RESULTADOS.....	74
VI.1 Introducción.....	74

Contenido (continuación)

	Página
VI.2 Simulador de Redes NS-2.26.....	74
VI.3 Modelos de propagación de radio para NS-2.....	76
VI.3.1 <i>Modelo de Espacio libre (Free Space)</i>	76
VI.3.2 <i>Modelo de Reflexión en Tierra a Dos Rayos (Two-Ray Ground Reflection)</i>	76
VI.3.3 <i>Modelo de Sombreo (Shadowing)</i>	76
VI.4 Extensiones de funcionamiento de NS-2.26.....	77
VI.5 Métricas para evaluar el desempeño del mecanismo propuesto.....	81
VI.5.1 <i>Tasa de Entrega de Paquetes (PDR)</i>	81
VI.5.2 <i>Retardo promedio extremo a extremo</i>	82
VI.5.3 <i>Sobrecarga de enrutamiento</i>	82
VI.5.4 <i>Sobrecarga</i>	83
VI.6 Escenarios, consideraciones de simulación y resultados.....	83
VI.6.1 <i>Consideraciones de simulación</i>	84
VI.6.2 <i>Escenario 1</i>	85
VI.6.2.1 <i>Tasa de entrega de paquetes (PDR)</i>	87
VI.6.2.2 <i>Retardo Promedio extremo a extremo</i>	88
VI.6.2.3 <i>Sobrecarga de enrutamiento</i>	89
VI.6.2.4 <i>Sobrecarga</i>	90
VI.6.2.5 <i>Comparación</i>	91
VI.6.3 <i>Escenario 2</i>	92
VI.6.3.1 <i>Tasa de entrega de paquetes (PDR)</i>	93
VI.6.3.2 <i>Retardo Promedio extremo a extremo</i>	94
VI.6.3.3 <i>Sobrecarga de enrutamiento</i>	95
VI.6.3.4 <i>Sobrecarga</i>	96
VI.6.3.5 <i>Comparación</i>	97
VI.6.4 <i>Escenario 3</i>	98
VI.6.4.1 <i>Tasa de entrega de paquetes (PDR)</i>	99
VI.6.4.2 <i>Retardo Promedio extremo a extremo</i>	100
VI.6.4.3 <i>Sobrecarga de enrutamiento</i>	101
VI.6.4.4 <i>Sobrecarga</i>	102
VI.6.4.5 <i>Comparación</i>	103
VI.6.5 <i>Escenario 4</i>	104
VI.6.5.1 <i>Tasa de entrega de paquetes (PDR)</i>	105
VI.6.5.2 <i>Retardo Promedio extremo a extremo</i>	106
VI.6.5.3 <i>Sobrecarga de enrutamiento</i>	107
VI.6.5.4 <i>Sobrecarga</i>	108
VI.6.5.5 <i>Comparación</i>	109
VI.7 Evaluando la dinámica del grupo de multi-difusión.....	110
VI.7.1 <i>Escenario 1</i>	111
VI.7.1.1 <i>Retardo promedio</i>	111
VI.7.1.2 <i>Sobrecarga de enrutamiento</i>	112

Contenido (continuación)

	Página
VI.7.1.3 Sobrecarga.....	113
VI.7.2 Escenario 2	113
VI.7.2.1 Retardo promedio.	114
VI.7.2.2 Sobrecarga de enrutamiento.....	114
VI.7.2.3 Sobrecarga.....	115
VI.7.3 Escenario 3	116
VI.7.3.1 Retardo promedio	116
VI.7.3.2 Sobrecarga de enrutamiento.....	117
VI.7.3.3 Sobrecarga.....	118
VI.7.4 Escenario 4	118
VI.7.4.1 Retardo promedio	119
VI.7.4.2 Sobrecarga de enrutamiento.....	120
VI.7.4.3 Sobrecarga.....	121
VI.8 Resumen.....	121
VII CONCLUSIONES	123
VII.1 Conclusiones	123
VII.2 Aportaciones	125
VII.3 Trabajo futuro	126
Referencias	128
Apéndice A.....	132
A.1 Modelo de Espacio Libre (Free Space).....	132
A.1.1 Simulación.....	133
A.2 Modelo de 2 rayos (Two-Ray Ground Reflection).....	134
A.2.1 Simulación.....	135
A.3 Modelo de sombreo (Shadowing).....	136
A.3.1 Simulación.....	139
A.4 Conclusiones.....	142

Lista de Figuras

Figura	Página
Figura 1. Red inalámbrica ad hoc.	2
Figura 2. Red inalámbrica de Infraestructura.	5
Figura 3. Ejemplo de multi-difusión, envía un solo paquete de multi-difusión a todos los receptores.	11
Figura 4. Formato del mensaje IGMP versión 1.	12
Figura 5. Formato del mensaje IGMP versión 2.	13
Figura 6. Árbol de trayectoria más corta del cliente A.	15
Figura 7. Árbol de distribución de tipo compartido.	16
Figura 8. Proceso de formación del árbol de distribución.	22
Figura 9. Árbol de multi-difusión.	29
Figura 10. Estructura de una malla de multi-difusión.	30
Figura 11. Dirección de enlace de subida (<i>upstream</i>).	48
Figura 12. Dirección de enlace de bajada (<i>downstream</i>).	48
Figura 13. Formato de mensaje RREQ.	49
Figura 14. Formato del mensaje RREP.	51
Figura 15. Formato del mensaje de activación de multi-difusión.	52
Figura 16. Formato del mensaje de hola de grupo.	54
Figura 17. Enrutador de frontera.	63
Figura 18. La fuente envía información, las ramas inactivas se podan.	65
Figura 19. Destinos envían mensaje <i>graft</i> y se crea el árbol de distribución.	65
Figura 20. El enrutador de frontera no retransmite tráfico no deseado.	66
Figura 21. Nodo móvil inicia proceso de unión, se difunde el RREQ-J en toda la red.	67
Figura 22. Primer nodo miembro del grupo de multi-difusión.	67
Figura 23. Nodo líder difunde mensaje GPRH.	68
Figura 24. Enrutador recibe el primer GPRH y envía el mensaje <i>graft</i> a la red cableada.	69
Figura 25. El Entrador de frontera realiza la conexión y el tráfico de multi-difusión llega a la red ad hoc.	70
Figura 26. Proceso de revocación de membresía para la red inalámbrica ad hoc.	71

Lista de Figuras (Continuación)

Figura	Página
Figura 27. Proceso de revocación de membresía para la red cableada.....	71
Figura 28. Nodo líder envía mensaje MACT-P y revoca su membresía.	72
Figura 29. Proceso de revocación de membresía del Enrutador de Frontera.	73
Figura 30. Proceso de unión del Enrutador de Frontera.	79
Figura 31. Estructura interna de un nodo de multi-difusión.	80
Figura 32. Visualización del escenario 1 con el NAM.	86
Figura 33. Escenario de simulación con 40 nodos móviles.	86
Figura 34. Gráficas de la PDR, velocidad de nodo: a) 0 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s y d) 3 m/s.	87
Figura 35. Gráficas del retardo promedio, velocidad de nodo: a) 0 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s y d) 3 m/s.	88
Figura 36. Gráfica de la sobrecarga de enrutamiento.	89
Figura 37. Gráfica de la sobrecarga en la red, velocidad de nodo: a) 0 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s y c) 3 m/s.	90
Figura 38. Comparación entre las métricas obtenidas del escenario 1.	91
Figura 39. Escenario de simulación con 30 nodos móviles.	92
Figura 40. Gráficas de la PDR, velocidad de nodo: a) 0 m/s, b) 1 m/s C) 2 m/s y d) 3 m/s.	93
Figura 41. Gráficas del retardo promedio, velocidad de nodo: a) 0 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s y c) 3 m/s.	94
Figura 42. Gráfica de la sobrecarga de enrutamiento.	95
Figura 43. Gráficas de la sobrecarga en la red, velocidad de nodo: a) 0 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s y d) 3 m/s.	96
Figura 44. Comparación entre las métricas obtenidas del escenario 2.	97
Figura 45. Escenario de simulación con 20 nodos móviles.	98
Figura 46. Gráfica de la PDR para una velocidad de nodo de: a) 0 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s y c) 3 m/s.	99
Figura 47. Gráfica del retardo promedio para velocidad de: a) 0 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s y c) 3 m/s.	100
Figura 48. Gráfica comparativa de la sobrecarga de enrutamiento.	101

Lista de Figuras (continuación)

Figura	Página
Figura 49. Gráficas de la sobrecarga, velocidad de nodo de: a) 0 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s y d) 3 m/s.....	102
Figura 50. Comparación entre las métricas obtenidas del escenario 3.....	103
Figura 51. Escenario de simulación con 10 nodos móviles.....	104
Figura 52. Gráfica de la PDR para una velocidad de nodo de: a) 0 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s y c) 3 m/s.....	105
Figura 53. Gráfica del retardo promedio para velocidad de: a) 0 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s y c) 3 m/s.....	106
Figura 54. Gráfica de la sobrecarga de enrutamiento.....	107
Figura 55. Gráficas de la sobrecarga, velocidad de nodo de: a) 0 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s y d) 3 m/s.....	108
Figura 56. Comparación entre las métricas obtenidas del escenario 4.....	109
Figura 57. Retardo promedio, a) para grupo dinámico. b) Comparación contra grupo estático.....	111
Figura 58. Sobrecarga de enrutamiento, a) para grupo dinámico. b) comparación contra un grupo estático.....	112
Figura 59. Sobrecarga de red, a) para un grupo dinámico, b) comparación contra un grupo estático.....	113
Figura 60. Retardo promedio, a) para un grupo dinámico, b) comparación contra un grupo estático.....	114
Figura 61. Sobrecarga de enrutamiento, a) para un grupo dinámico, b) comparación contra un grupo estático.....	114
Figura 62. Sobrecarga, a) para un grupo dinámico, b) comparación contra un grupo estático.....	115
Figura 63. Retardo promedio, a) para un grupo dinámico, b) comparación contra un grupo estático.....	116
Figura 64. Sobrecarga de enrutamiento, a) para un grupo dinámico, b) comparación contra un grupo estático.....	117
Figura 65. Sobrecarga en la red, a) para un grupo dinámico, b) comparación contra un grupo estático.....	118
Figura 66. Retardo promedio, a) para un grupo dinámico, b) comparación contra un grupo estático.....	119

Lista de Figuras (continuación)

Figura	Página
Figura 67. Sobrecarga de enrutamiento, a) para un grupo dinámico, b) comparación contra un grupo estático.....	120
Figura 68. Sobrecarga de la red, a) para un grupo dinámico, b) comparación contra un grupo estático.....	121
Figura 69. Comportamiento de la PDR con respecto a la distancia en el modelo de espacio libre.....	134
Figura 70. Comportamiento del PDR con respecto a la distancia en el modelo de 2 rayos.....	136
Figura 71. Comportamiento del PDR respecto a la distancia para una $\beta = 2$	139
Figura 72. Comparación entre los modelos Espacio Libre y Sombreo.....	140
Figura 73. Respuesta del PDR respecto a la distancia, usando $\beta = 2.5$	140
Figura 74. Respuesta del PDR respecto a la distancia, usando $\beta = 2.75$	141
Figura 75. Respuesta del PDR respecto a la distancia, usando $\beta = 3$	141
Figura 76. Respuesta del PDR respecto a la distancia, usando $\beta = 3.25$	141
Figura 77. Gráfica que muestra el comportamiento de la PDR con distintos valores de β	142

Lista de Tablas

Tabla	Página
Tabla I. Parámetros de simulación para el Escenario 1.	87
Tabla II. Sobrecarga de enrutamiento.	89
Tabla III. Parámetros de simulación para el Escenario 2.	92
Tabla IV. Sobrecarga de enrutamiento.	95
Tabla V. Parámetros de simulación para el Escenario 3.	98
Tabla VI. Sobrecarga de enrutamiento.	101
Tabla VII. Parámetros de simulación para el Escenario 4.	104
Tabla VIII. Sobrecarga de enrutamiento.	107
Tabla IX. Valores típicos de β	137
Tabla X. Valores típicos de σ_{dB}	138

Capítulo I

Introducción

Debido al crecimiento en el uso de dispositivos móviles, como computadoras portátiles y PDAs, se ha incrementado la necesidad de comunicación entre este tipo de dispositivos. Para este propósito, se han desarrollado una variedad de tecnologías para redes inalámbricas como *Bluetooth* o el estándar IEEE 802.11.

Por otro lado, el consumo de potencia es un importante factor en los dispositivos móviles, debido a que las fuentes de alimentación son limitadas, así que los transmisores están restringidos para tener un alcance de 10 a 100 m; de esta forma, para proporcionar buena conectividad en un área geográfica grande, es necesario instalar una red inalámbrica de infraestructura utilizando varios puntos de acceso. Además, comúnmente los enlaces no se establecen automáticamente, sino que requieren de interacción humana.

Las redes ad hoc resuelven el problema de extender el acceso a una red de infraestructura cableada debido a que los nodos inalámbricos implementan la función de enrutamiento. Los nodos en una red móvil ad hoc (MANET) intercambian información mediante

comunicación a un salto o multi-saltos en ambiente punto a punto; para tal efecto los nodos intermedios, entre un par de nodos comunicándose, actúan como enrutadores. Como los nodos en una red ad hoc pueden ser móviles, las rutas que se establecen entre cualquier par de nodos se pueden ver afectadas por la adición o eliminación de nodos en la red; por lo tanto, la topología de la red puede cambiar rápida e inesperadamente. La figura 1 muestra un ejemplo de una red inalámbrica ad hoc.

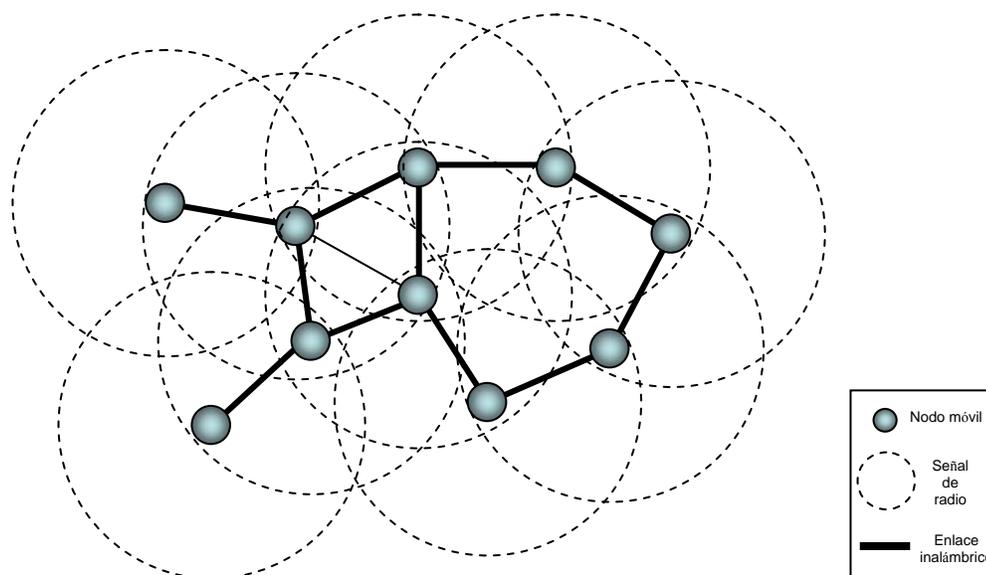


Figura 1. Red inalámbrica ad hoc.

Las redes inalámbricas ad hoc son útiles para muchos ambientes y aplicaciones ya que no requieren de infraestructura alguna. Aplicaciones como comunicación en campo de batalla, en zonas de desastre, comunicación entre edificios cercanos de un centro corporativo, comunicaciones en redes de sensores, comunicaciones entre islas usando nodos enrutadores en boyas, comunicación en redes residenciales y redes locales inalámbricas tipo malla, entre otras, pueden establecerse mediante la implementación de una red móvil ad hoc.

Como se ha mencionado con anterioridad, las redes inalámbricas ad hoc se pueden utilizar para extender la cobertura de una red cableada. Sin embargo; hay diversos factores que se deben de tomar en cuenta. Por ejemplo, la intercomunicación dentro de las redes ad hoc móviles difiere de las redes cableadas en los siguientes aspectos [Mohapatra et al., 2005]:

- El medio inalámbrico tiene características variables e impredecibles. La intensidad de la señal de radio y el retardo de propagación fluctúan con respecto al tiempo y al ambiente.
- El ancho de banda disponible y la energía de las baterías son limitadas en las redes móviles ad hoc. Así que algoritmos y protocolos necesitan optimizar ancho de banda y energía.
- Los elementos de cómputo (procesador, memoria, puertos de E/S) usados en dispositivos móviles inalámbricos usualmente tienen poca capacidad y potencia de procesamiento limitada. De manera que los algoritmos y protocolos de comunicación necesitan ser ligeros en términos de necesidades computacionales o de almacenamiento.
- En algunos escenarios la movilidad de los nodos crea continuamente cambios en la topología, de tal forma que las trayectorias de enrutamiento se rompen y dinámicamente se forman rutas nuevas.
- A diferencia de las redes cableadas, el medio inalámbrico es un medio promiscuo, es decir, no importa que sea un nodo el destinatario específico, todos los nodos dentro del alcance escuchan los paquetes simultáneamente.

Otro aspecto de interés, es el que se relaciona con la multi-difusión de datos. La multi-difusión IP fue propuesta hace más de una década como una extensión a la arquitectura de Internet para dar servicio a múltiples clientes en la capa de red. La motivación fundamental detrás de IP Multicast es la de ahorrar recursos de red tal como el ancho de banda, transmitiendo una sola copia de los datos para alcanzar múltiples receptores simultáneamente.

I.1 Motivación

Como ya se mencionó, el rápido crecimiento en la tecnología inalámbrica ha traído como consecuencia la necesidad de ofrecer servicios de Internet inalámbrico a los dispositivos móviles de manera eficiente. La integración de redes inalámbricas con redes cableadas para tráfico de tipo unicast ya ha sido ampliamente investigado [Cha et al., 2003; Hamidian, 2003; Jelger et al., 2003; Wakikawa et al., 2002; So y Vahadilla, 2006]. Por otro lado, la integración de los protocolos de multi-difusión para redes cableadas y los que se utilizan en redes inalámbricas ad hoc requieren de un mayor estudio.

I.2 Planteamiento del problema

En la actualidad los dispositivos inalámbricos son cada vez más comunes en hogares y oficinas y la gran mayoría de las redes inalámbricas instaladas son de tipo infraestructura, donde la comunicación entre los clientes de la red depende de un coordinador central que se conoce como punto de acceso. La figura 2 muestra una red inalámbrica de tipo infraestructura.

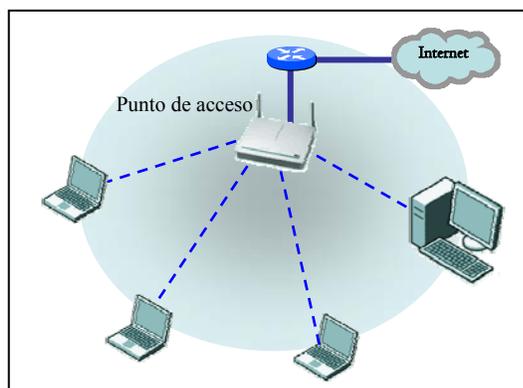


Figura 2. Red inalámbrica de Infraestructura.

Si se implementa una red inalámbrica ad hoc para extender la cobertura de la red cableada y así extender los servicios de Internet a nodos inalámbricos, es necesario utilizar una estrategia que nos permita ahorrar ancho de banda, esta estrategia es utilizar mecanismos de multi-difusión, al implementar un mecanismo de multi-difusión en la red inalámbrica ad hoc, tenemos un solo flujo de datos que se entregan a todos los nodos interesados en recibir ese servicio. Sin embargo, en la literatura solo se mencionan estrategias para la multi-difusión donde la fuente o las fuentes de tráfico están dentro de la red inalámbrica ad hoc. La fuente de datos está en la red cableada y se desea entregar servicios de multi-difusión a una red ad hoc, una solución es utilizar los mecanismos existentes de multi-difusión para redes cableadas, pero esto no sería eficiente, porque causaría problemas en la red inalámbrica, otra solución es la de lograr la interoperabilidad de dos mecanismos de multi-difusión, una para la red cableada y otro para la red inalámbrica ad hoc y de esta manera lograr que los servicios de multi-difusión de Internet sean entregados a clientes en una red inalámbrica ad hoc.

En este trabajo de investigación se considera un escenario donde se tiene un enrutador inalámbrico conectado a la red cableada y varios enrutadores inalámbricos con sus clientes asociados, de manera que se tiene una red ad hoc muy similar a una red de tipo malla. Como parte de la contribución de este trabajo se pretende lograr la interoperabilidad entre dos mecanismos de multi-difusión, uno para redes ad hoc y otro para redes cableadas, con la finalidad de que los nodos en la red ad hoc puedan recibir tráfico de multi-difusión desde Internet. De esta forma los clientes en la red ad hoc podrán registrarse como miembros activos de un grupo y recibir este tráfico desde Internet. Para lograr la correcta interoperabilidad, se propone hacer modificaciones en el mecanismo instalado en la red ad hoc y realizar modificaciones en el enrutador inalámbrico que servirá como puerta de enlace de la red ad hoc.

I.3 Objetivo de la tesis

El objetivo de este proyecto de tesis es adaptar un mecanismo de multi-difusión para una red heterogénea (i.e. una red cableada y una red inalámbrica ad hoc) con el propósito de que el tráfico de multi-difusión generado por un servidor de Internet pueda ser enviado por una red inalámbrica ad hoc.

Como parte del proyecto de investigación se considera:

- Estudio y comparación de diferentes mecanismos de multi-difusión para redes inalámbricas ad hoc.

- Proponer una arquitectura para lograr la interoperabilidad de servicios de multi-difusión en una red heterogénea (i.e. red cableada y red inalámbrica ad hoc).
- Implementar la arquitectura propuesta en un simulador de redes.
- Evaluación del desempeño del mecanismo de multi-difusión en la arquitectura propuesta.

I.4 Infraestructura

Para el desarrollo de este trabajo 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:

- Computadora portátil HP Pavilion dv6020us, procesador Centrino Duo a 1.73 GHz, 1024 MB de RAM y 120 GB de disco duro. Corriendo Linux instalado en máquina virtual *Microsoft Virtual PC*, bajo el sistema operativo Windows XP SP2.
- 2 computadoras Dell, Pentium 4, 512 de RAM y 80 GB de disco duro, con Linux Mandrake 9.2.
- Computadora DELL Dimension E520, Pentium D, 1024 MB en RAM y 160 GB en Disco duro. Corriendo Linux Mandrake 9.2 en máquina virtual *Microsoft Virtual PC*, bajo el sistema operativo Windows Vista.

- Conexión a Internet.
- Bibliotecas UNAM y CICESE.
- Software de simulación Network Simulator 2 (NS-2.26).
- Programas de Aplicación: Office 2003, Adobe Acrobat 7, Mozilla Firefox.

I.5 Estructura del trabajo

El presente trabajo de tesis está dividido en un total de siete capítulos, los cuales están organizados de la siguiente manera:

- en el capítulo 2, se presenta una descripción de los mecanismos de multi-difusión propuestos en la literatura para redes cableadas (i.e. Internet); de igual forma se describen las clases a las que pertenecen. Adicionalmente se presenta una breve descripción del mecanismo de multi-difusión DVMRP¹ que se utilizó en este trabajo de investigación;
- en el capítulo 3, se describen las familias de mecanismos de multi-difusión propuestos para redes inalámbricas ad hoc;
- en el capítulo 4 presenta una descripción detallada del protocolo de multi-difusión MAODV²; el protocolo MAODV fue utilizado para el tráfico de multi-difusión en la red inalámbrica ad hoc;

¹ Distance Vector Multicast Routing Protocol

² Multicast Ad hoc On Demand Distance Vector

- en el capítulo 5, se describen las modificaciones realizadas al mecanismo de multi-difusión en la arquitectura de red propuesta y se describe el principio de operación del mecanismo de interoperabilidad;
- en el capítulo 6, se describe la implementación del sistema en el simulador, así como los diferentes parámetros utilizados en el mismo. De igual forma, se presentan y analizan los resultados obtenidos;
- finalmente, en el capítulo 7, se presentan las conclusiones de la tesis, y se proponen algunas líneas de investigación para futuros trabajos.

Capítulo II

Multi-difusión IP

II.1 Introducción

La multi-difusión es una técnica que se utiliza para ahorrar de ancho de banda, ya que reduce el tráfico entregando simultáneamente un flujo individual de información hacia varios destinos. Existen diversas aplicaciones que se pueden beneficiar al utilizar el servicio de multi-difusión, algunos ejemplos incluyen: videoconferencia, comunicaciones corporativas, aprendizaje a distancia, distribución de software, noticias, radio, cotización de acciones, televisión IP, entre otros.

El uso de Multi-difusión IP permite la transmisión de información hacia múltiples usuarios sin introducir sobrecarga significativa al nodo fuente o destino, con esto se reduce el ancho de banda utilizado por el tráfico en la red. A través de IP Multicast es posible enviar tráfico a múltiples receptores utilizando protocolos de multi-difusión en los enrutadores instalados en la red. Otras alternativas como la transmisión unicast requieren que el nodo fuente genere más de una copia de los paquetes que serán transmitidos, esto es que el nodo fuente

entregue una copia del tráfico a cada uno de los destinos. La figura 3 muestra cómo los datos son entregados desde una fuente a diferentes destinos usando Multi-difusión IP.

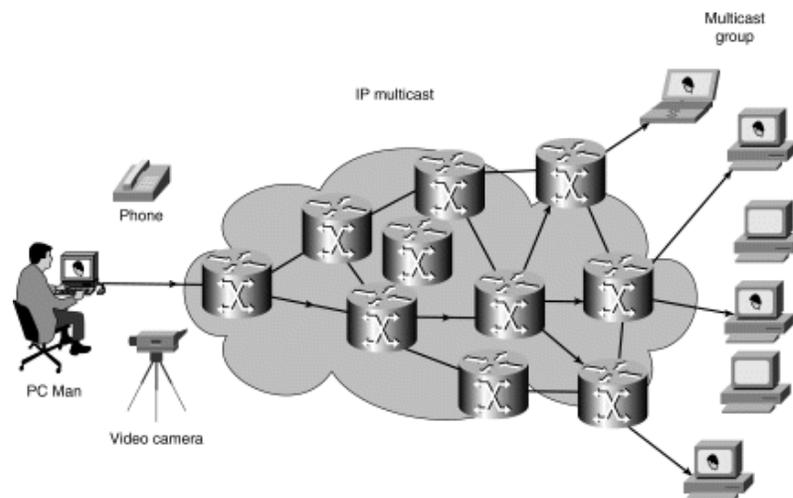


Figura 3. Ejemplo de multi-difusión, envía un solo paquete de multi-difusión a todos los receptores.

II.2 Concepto de grupo de multi-difusión.

La técnica de multi-difusión está basada en el concepto de grupo. El grupo de multi-difusión, es un conjunto de nodos que reciben simultáneamente tráfico desde una fuente. Los usuarios deben ser miembros de un grupo para poder recibir los datos. Para formar un grupo de multi-difusión, es necesario que los nodos que serán receptores expresen su interés por pertenecer a dicho grupo. Los usuarios interesados en unirse al grupo deben utilizar el Protocolo de Administración de Grupo de Internet (IGMP).

II.3 Protocolo de Administración de Grupos de Internet (IGMP).

El protocolo IGMP es utilizado para registrar dinámicamente a los nodos dentro de un grupo de multi-difusión. Para tal efecto, el protocolo IGMP establece un mecanismo para el intercambio y actualización de información sobre la suscripción a un grupo de multi-difusión de los equipos de un segmento. El diálogo se desarrolla entre los equipos miembros y los enrutadores de multi-difusión (*m routers*) de su segmento y posibilita la conexión y desconexión de los equipos a los grupos de multi-difusión. Los equipos informan acerca de su membresía a un grupo y los enrutadores de multi-difusión sondan periódicamente el estado de dichas membresías.

II.4 Mensaje IGMP.

II.4.1 IGMP versión 1

El RFC 1112 define las especificaciones para la versión 1 de IGMP. La figura 4 muestra el formato del mensaje IGMP versión 1.

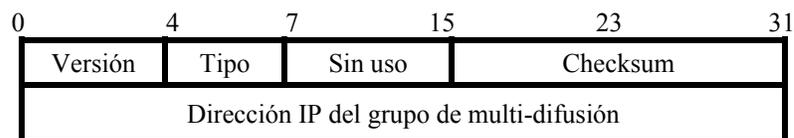


Figura 4. Formato del mensaje IGMP versión 1.

En la versión 1 existen solo 2 tipos de mensajes IGMP:

- ▲ Encuesta de Membresía
- ▲ Reporte de Membresía

Los nodos envían mensajes IGMP de reporte de membresía a un grupo de multi-difusión para indicar que desean unirse al grupo. Los enrutadores periódicamente envían mensajes IGMP de encuesta de membresía para verificar que por lo menos existe un nodo que siga interesado en recibir tráfico del grupo de multi-difusión. Cuando un enrutador no recibe respuesta a tres mensajes de encuesta IGMP, éste deja de transmitir el tráfico correspondiente al grupo [Deering, 1989].

II.4.2 IGMP versión 2

El RFC 2236 define las especificaciones para IGMP Versión 2. La figura 5 muestra el formato del mensaje IGMP versión 2.

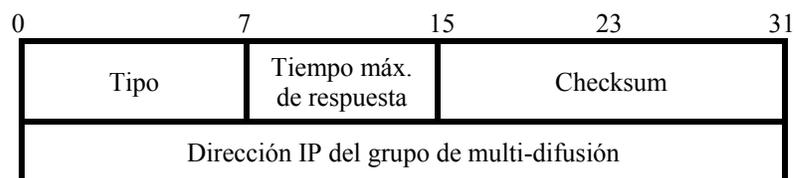


Figura 5. Formato del mensaje IGMP versión 2.

En la versión 2 de IGMP existen 4 tipos de mensajes:

- ▲ Encuesta de membresía
- ▲ Reporte de membresía versión 1
- ▲ Reporte de membresía versión 2
- ▲ Salir del Grupo

IGMP versión 2 trabaja de manera similar a IGMP versión 1. La diferencia principal estriba en que los nodos ahora pueden manifestar activamente su intención de salir de un grupo. En el mensaje IGMP versión 2, el campo de “tiempo máximo de respuesta” se utiliza solo en los mensajes de encuesta de membresía [Fenner, 1997]. Esto reduce considerablemente el retardo en comparación con el mensaje IGMP versión 1, ya que el tráfico innecesario e indeseable se puede detener más pronto.

II.5 Árboles de distribución para multi-difusión.

Los enrutadores de multi-difusión deben crear árboles de distribución para controlar la trayectoria del tráfico de Multi-difusión IP. Los miembros del grupo de multi-difusión pueden unirse o dejar al grupo cuando lo deseen, los árboles de distribución deben actualizarse dinámicamente. Cuando todos los receptores activos en una rama en particular dejan de solicitar tráfico de un grupo específico, los enrutadores podan la rama del árbol de distribución y detienen la retransmisión de paquetes por ella. Los dos tipos básicos de árboles de distribución de multi-difusión son: árboles fuente y árboles compartidos.

II.5.1 Árboles fuente.

La forma más simple para un árbol de distribución de multi-difusión es la estructura de árbol fuente, cuya raíz es la fuente de tráfico de multi-difusión y sus ramas atraviesan la red hacia los receptores. Este tipo de configuración utiliza el esquema de trayectoria más corta para establecer las trayectorias hacia los receptores. Por lo anterior también se le denomina

árbol de la trayectoria más corta (STP). La figura 6 muestra un ejemplo de un árbol de distribución SPT para un grupo 224.1.1.1 arraigado en la fuente, el nodo A se conecta con dos receptores, los nodos B y C.

La notación (S, G) identifica a un árbol de trayectoria más corta, en el cual S es la dirección IP de la fuente y G es la dirección IP del grupo de multi-difusión. La notación (S, G) para el ejemplo de la figura 6 sería (192.1.1.1, 224.1.1.1). La notación (S, G) implica que existe un árbol de distribución SPT para cada fuente que envía tráfico a cada grupo.

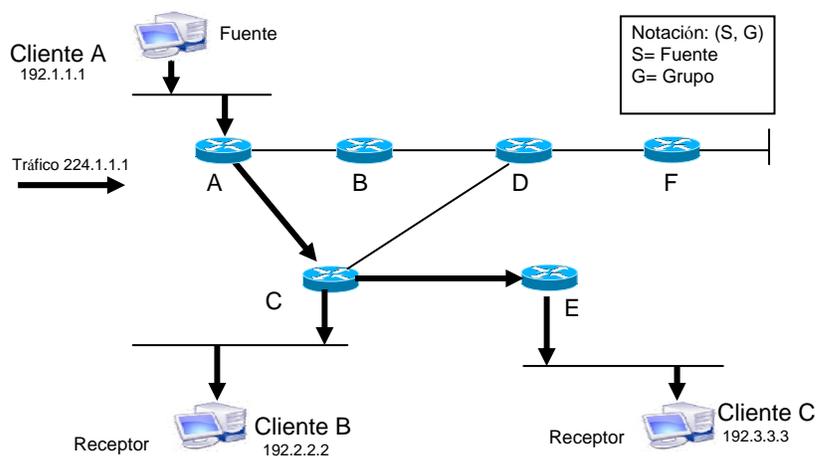


Figura 6. Árbol de trayectoria más corta del cliente A.

La ventaja de los árboles SPT es que crean trayectorias óptimas entre la fuente y los receptores. Esto garantiza mínima latencia en la red por retransmisión de tráfico de multi-difusión. Sin embargo, si en la red hay miles de fuentes y miles de grupos de multi-difusión puede haber problemas con los recursos de los enrutadores, el consumo de memoria y el

tamaño de la tabla de enrutamiento de multi-difusión son factores que los diseñadores deben tomar en consideración.

II.5.2 Árboles compartidos.

A diferencia de los árboles fuente que tienen a la fuente como raíz del árbol, los árboles compartidos utilizan una raíz común que se coloca en un punto en particular en la red. La raíz se conoce como el punto de encuentro (RP). En esta configuración todo el tráfico de multi-difusión se envía al nodo raíz. En este caso se utiliza una notación (*, G) para identificar al árbol compartido del grupo G. La figura 7 muestra un árbol compartido para el grupo 224.2.2.2 con la raíz en el enrutador D, la notación para este árbol es: (*, 224.1.1.1).

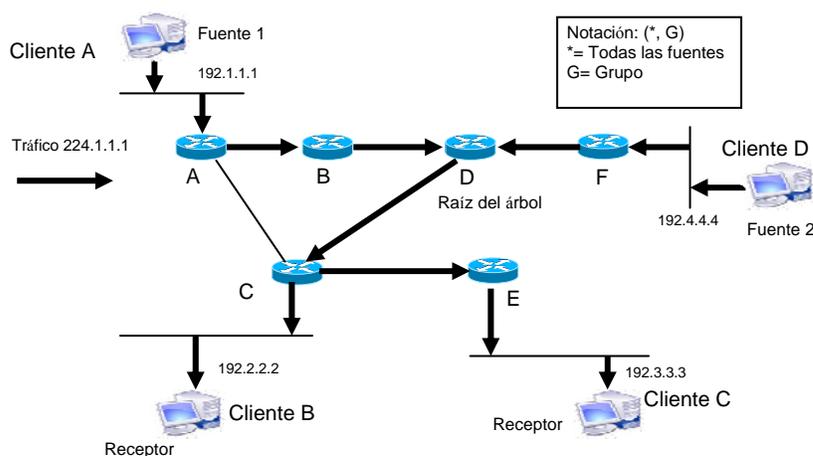


Figura 7. Árbol de distribución de tipo compartido.

Cuando se usa un árbol compartido, las fuentes deben enviar su tráfico al enrutador raíz, este enrutador se encarga de reenviar el tráfico a través del árbol compartido para alcanzar a todos los receptores.

La ventaja de los árboles compartidos es que requieren una mínima cantidad de estados en cada enrutador, esto reduce los requerimientos de memoria para una red que permite solamente árboles compartidos. La desventaja de los árboles compartidos es que, bajo ciertas circunstancias, las trayectorias entre la fuente y los receptores podrían no ser trayectorias óptimas, las cuales podrían introducir latencia en la entrega de los paquetes.

II.6 Propagación Multicast.

En el caso de enrutamiento unicast, el tráfico es dirigido a través de la red a lo largo de una trayectoria individual desde la fuente hasta el destino. De esta forma los enrutadores no toman en cuenta la dirección de la fuente y solamente verifican de la dirección del destino para propagar el tráfico por la ruta hacia el nodo destino.

En el caso de enrutamiento de multi-difusión, la fuente envía tráfico a un grupo arbitrario de clientes representado por una dirección de multi-difusión. El enrutador de multi-difusión debe determinar cuál es su dirección de flujo ascendente (hacia la fuente) y cuál o cuáles son sus direcciones de flujo descendentes (hacia el o los destinos). Si hay múltiples trayectorias en flujo descendente, el enrutador reproduce los paquetes y redirige el tráfico hacia las trayectorias descendentes apropiadas. Este concepto de dirigir tráfico de multi-

difusión fuera de la fuente en lugar de al receptor se le conoce como *Propagación por la Trayectoria Inversa*.

II.6.1 Propagación por la Trayectoria Inversa (RPF)

El algoritmo RPF habilita a los enrutadores para una correcta propagación del tráfico de multi-difusión hacia el árbol de distribución; el algoritmo RPF utiliza la información de las tablas de enrutamiento unicast para conocer a sus vecinos en flujo ascendente o descendente. Un enrutador redirige paquetes de multi-difusión solo si los recibió por la interfaz de flujo ascendente, de esta forma se garantiza que el árbol de distribución estará libre de bucles (loop-free).

II.7 Protocolo de Multi-difusión Independiente (PIM)

Este protocolo puede operar sobre cualquier protocolo de enrutamiento unicast utilizado para llenar la tabla de enrutamiento, el algoritmo PIM utiliza esta información de enrutamiento unicast para realizar la función de retransmisión de multi-difusión, se utilizan principalmente dos modos: PIM de modo denso y PIM de modo disperso.

II.7.1 PIM Modo Denso.

El protocolo PIM de modo denso (PIM-DM) utiliza un modelo de empuje para inundar con tráfico de multi-difusión a toda la red. Éste es un método de fuerza bruta para entregar datos a los receptores y en ciertas aplicaciones puede ser un mecanismo eficiente si hay receptores activos en cada subred en la red [Adams et al., 1993].

PIM-DM inicialmente inunda de tráfico de multi-difusión toda la red, los enrutadores que no tienen algún vecino en su interfaz descendente *podan* el tráfico no deseado. Este proceso se repite cada 3 minutos.

El mecanismo de inundación y de podado es la manera como los enrutadores acumulan su información de estado, recibiendo el flujo de datos. Este flujo de datos contiene información de la fuente y del grupo, para que los enrutadores conectados en la interfaz de enlace descendente puedan construir sus tablas de enrutamiento de multi-difusión. PIM-DM solo opera con árboles fuente, con registros (S, G) y no puede ser utilizado para construir un árbol de distribución compartida.

II.7.2 PIM Modo Disperso.

El protocolo PIM de modo disperso (PIM-SM) utiliza un modelo de empuje para entregar tráfico de multi-difusión. Solamente a las redes que tienen receptores activos que hayan solicitado explícitamente los datos se les entregará tráfico. PIM-SM está descrito en el RFC 2362 [Estrin et al., 1998].

El protocolo PIM-SM utiliza un árbol compartido para distribuir la información sobre fuentes activas. Dependiendo de la configuración, el tráfico puede permanecer en el árbol compartido o puede conmutarse a una distribución de árbol optimizado basado en fuente. El tráfico fluye por el árbol compartido y los enrutadores a lo largo de la trayectoria

determinan si hay una mejor trayectoria hacia la fuente; si existe una mejor trayectoria, el enrutador designado (el enrutador más cercano al receptor) enviará mensajes de unión (join) hacia la fuente y redireccionará el tráfico por esa trayectoria.

El protocolo PIM-SM maneja el concepto de Punto de Encuentro (RP), puesto que utiliza árboles compartidos. El RP es un enrutador que actúa como raíz del árbol compartido en la red [Cisco Press, 2004], las fuentes se registran con el RP y los datos que llegan a él son retransmitidos a través del árbol compartido hacia los receptores. Si el árbol compartido no es una trayectoria óptima entre la fuente y el receptor, los enrutadores crean dinámicamente un árbol fuente y detienen el tráfico que fluye por el árbol compartido.

El protocolo PIM-SM usa también árboles basados en fuente, en los cuáles se construye un árbol de distribución por separado para cada fuente que envía datos a un grupo de multi-difusión. Cada árbol tiene su raíz en el enrutador adyacente a la fuente y las fuentes envían datos directamente a la raíz del árbol. Los árboles basados en la fuente habilitan la función Multicast de Fuente Específica (SSM), la cual permite al los clientes especificar la fuente de la que quieren recibir datos, así como al grupo de multi-difusión al que quieren unirse. Con la función SSM un cliente identifica un flujo de datos de multi-difusión con un par de direcciones fuente-grupo (S, G), en lugar de solo la dirección del grupo (*, G).

II.8 DVRMP

Protocolo de Enrutamiento de Multi-difusión de Vector de Distancia (DVMRP), es un protocolo de enrutamiento de Internet que proporciona una eficiente de entrega de información a un grupo de clientes en la red. Este protocolo está basado en un modelo de vector de distancia, es decir, cada enrutador mantiene una tabla de enrutamiento indexada con un registro para cada enrutador de la red; cada entrada comprende dos partes: el enlace de salida preferido hacia el destino y una estimación de la distancia hacia dicho destino. Estas tablas se actualizan intercambiando la información con los enrutadores vecinos. El protocolo DVMRP utiliza una variante del Protocolo de Información de Enrutamiento (RIP) para descubrir la trayectoria más corta hacia la fuente. [Waitzman et al., 1988].

Cada enrutador envía periódicamente su tabla de rutas a los enrutadores vecinos a través de la dirección 224.0.0.4 (que es la dirección para todos los enrutadores DVMRP); de esta forma cada enrutador calcula las rutas óptimas hacia los distintos destinos existentes. Para el intercambio de paquetes, el protocolo DVMRP utiliza el algoritmo RPF (Propagación por la trayectoria inversa); cuando un enrutador recibe un paquete de multi-difusión por alguna de sus interfaces, se extrae la dirección origen, si se recibe el paquete por la interfaz que tiene en flujo ascendente (también llamada interfaz RPF) reenvía el paquete por las interfaces restantes, en otro caso descarta el paquete.

Con el envío del primer paquete de multi-difusión se establece un árbol de difusión que alcanza a todas las subredes, aunque no tengan miembros activos de ese grupo. Cada

enrutador que ha recibido un mensaje de multi-difusión es automáticamente parte del árbol, si los enrutadores no tienen algún miembro en sus interfaces, envían un mensaje de poda (*prune*) por la interfaz de donde le llegó el mensaje de multi-difusión. De igual forma, el enrutador que reciba mensajes *prune* por todas sus interfaces en flujo descendente enviará el mensaje *prune* por su interfaz ascendente. El proceso se efectúa en todos los enrutadores de la red hasta formar el árbol para este grupo de multi-difusión. La figura 8 muestra el proceso anteriormente descrito; a) se envía el tráfico de multi-difusión, b) todos los enrutadores son parte del árbol, c) enrutadores sin miembros activos se podan del árbol y d) árbol de multi-difusión creado solo con ramas con miembros activos.

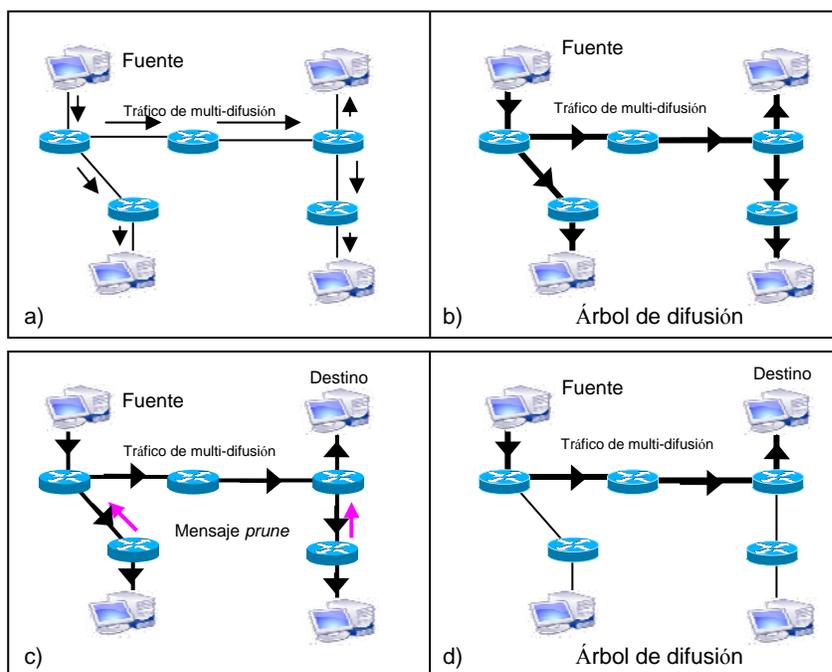


Figura 8. Proceso de formación del árbol de distribución.

Si una rama previamente podada tiene ahora algún miembro del grupo de multi-difusión, es decir existe interés de algún cliente en pertenecer al grupo de multi-difusión, el cliente envía un mensaje IGMP de unión y el enrutador asociado al cliente envía el mensaje de inserción (*graft*) para agregar una nueva rama al árbol de multi-difusión. Cada árbol de multi-difusión es mantenido dinámicamente podando e injertando ramas conforme los miembros dejen o se unan al grupo de multi-difusión, respectivamente. En el capítulo 5 se detalla un poco más el funcionamiento del protocolo DVMRP.

Capítulo III

Mecanismos de multi-difusión para redes ad hoc

III.1 Introducción

Los protocolos de multi-difusión para redes cableadas ofrecen multi-difusión eficiente, estos protocolos se diseñaron para redes fijas, donde no hay cambios significativos en la topología. Tratar de implementar estos protocolos en redes móviles ad hoc no resulta conveniente, debido a las características principales de una red inalámbrica móvil (como el ancho de banda limitado y el cambio en la topología de red). Por ello se han propuesto nuevos mecanismos de multi-difusión exclusivamente para redes móviles ad hoc.

Para el diseño de estos mecanismos se deben de considerar las características de las redes inalámbricas, incluyendo aspectos como tamaño de la red, movilidad de la red, tamaño del grupo de multi-difusión. Por otro lado, los nodos de una red móvil ad hoc usualmente dependen de baterías y por esta razón los mecanismos de enrutamiento deben limitar la cantidad de información de control que pasa por los nodos. El desempeño de los

mecanismos de multi-difusión para redes ad hoc está regido por tres parámetros principales: retardo, eficiencia y robustez [Durst et al., 2001]. Como las redes ad hoc son muy variadas, pueden existir redes muy pequeñas o redes muy grandes, pueden estar compuestas de nodos con alta movilidad o baja movilidad, o bien pueden estar compuestas por una mezcla de características, por ello se han diseñado mecanismos que se enfocan a distintos tipos de redes y no existe un mecanismo que sea eficiente y robusto para cualquier tipo de red ad hoc.

Una manera de proporcionar multi-difusión en una red ad hoc es a través de la inundación. Con esta técnica, los paquetes de datos son enviados a través de la red ad hoc y cada nodo que recibe este paquete lo difunde (en modo broadcast) una sola vez a todos sus vecinos inmediatos. En cada nodo se selecciona un tiempo aleatorio para retransmitir el mensaje y así evitar colisiones. Este método puede emplearse en una red con alto grado de movilidad, de tal forma que inundar la red por completo podría ser una alternativa viable para multi-difusión confiable, sin embargo esta técnica genera una sobrecarga considerable por la cantidad de paquetes duplicados que son retransmitidos debido a las colisiones que existen cuando la red es muy grande.

III.2 Clasificación de los protocolos de multi-difusión para redes ad hoc

Las técnicas de multi-difusión para redes móviles ad hoc se pueden clasificar basándose en la dinámica del grupo de multi-difusión o en la dinámica de la red.

III.2.1 Tratando con la dinámica del grupo de multi-difusión

Los principios generales para manejar la dinámica de las membresías en los protocolos de multi-difusión de las redes ad hoc son: *en demanda*, *iniciado por receptor*, *estado suave basado en temporizador*. La idea básica del principio *en demanda* es la de construir y mantener rutas de multi-difusión sólo cuando son requeridas. En el principio de *iniciado por receptor*, es responsabilidad del receptor encontrar y no perder de vista una sesión de multi-difusión. Si algunos estados deben de mantenerse para hacer que una sesión de multi-difusión funcione, es deseable usar un *estado suave basado en temporizador*, en lugar de un estado duro. Los estados suaves se mantienen en demanda y se actualizan (i.e. mantienen activos) periódicamente; de otra manera, el temporizador asociado expira y el estado es removido de los nodos intermedios [Mohapatra et al., 2005].

III.2.2 Tratando con la dinámica de la red

Los mecanismos de multi-difusión para redes ad hoc, necesitan contrarrestar los efectos causados por las características de la red para alcanzar robustez y eficiencia. Una de las principales fuentes de dinamismo de red es la movilidad y las fallas de los nodos. En seguida se describe brevemente algunas técnicas básicas que se implementan para resolver estos retos.

III.2.2.1 Técnica 1: Dependencia de más nodos

Debido a que los nodos en una red ad hoc pueden ser móviles, cada nodo intermedio podría sufrir de una posible ruptura de enlace. Si incluimos más nodos en la estructura de

distribución de multi-difusión, podemos obtener mejor conectividad entre los miembros del grupo. De esta forma, cuando un enlace se rompe debido a la movilidad, tenemos una buena oportunidad de encontrar una ruta alternativa. En otras palabras, no se requiere inicializar un procedimiento de mantenimiento de ruta cada vez que un enlace falla.

III.2.2.2 Técnica 2: Dependencia de pocos nodos

Puesto que los nodos en la red ad hoc pueden ser móviles, un número grande de nodos que se involucran en la creación y mantenimiento de rutas consumen tiempo y recursos. Limitando el número de nodos implicados en la creación de la estructura de distribución del tráfico de multi-difusión, la sobrecarga por mensajes de control se reduce.

III.2.2.3 Técnica 3: Dependencia de nodos más estables

Esta técnica intenta tomar ventaja de la movilidad y de la arquitectura de la red. Si los nodos en la red tienen diferentes grados de movilidad, por ejemplo, alto y bajo, se pueden utilizar los nodos lentos (más estables) para construir las rutas de multi-difusión. Nótese que las definiciones de alto y bajo grado de movilidad son relativas. Por ejemplo, un grupo de nodos pueden moverse rápido hacia la misma dirección, pero el grado de movilidad relativo entre ellos es bajo.

III.2.2.4 Técnica 4: Dependencia en una capa de apoyo

Adaptarse a la dinámica de la red es una carga adicional para los protocolos de multi-difusión. Al hacer uso de una capa intermedia, podemos esconder el dinamismo en las capas inferiores y permitir que el protocolo de multi-difusión se concentre solamente en la transmisión de tráfico de multi-difusión. En esta técnica, los protocolos de multi-difusión normalmente construyen una malla de apoyo encima de la red física y la ruta de multi-difusión se construye encima de esta malla. Sin conocer la dinámica que hay detrás, es más sencillo para el protocolo de multi-difusión enfocarse sólo en la transmisión de tráfico de multi-difusión.

III.3 Mecanismos de multi-difusión

Existe una buena cantidad de mecanismos propuestos para entregar multi-difusión confiable en redes inalámbricas ad hoc, para facilitar su estudio se hace una clasificación basado en cómo se crean las rutas hacia los miembros del grupo.

Algunos de estos mecanismos están limitados a ciertas condiciones de red, por ello se propone la siguiente clasificación [de Morais et al., 2003; Mohapatra et al., 2005]

Las categorías son:

- Mecanismos basados en árbol.
- Mecanismos basados en malla.
- Mecanismos de estructura de dorsal.

- Mecanismos de multi-difusión sin estado.
- Mecanismos de multi-difusión sobrepuesta (overlay).
- Mecanismos de multi-difusión por ubicación asistida.
- Mecanismos basados en probabilidad.
- Mecanismos híbridos

III.3.1 Mecanismos basados en árbol

Los mecanismos de multi-difusión basados en árbol trabajan muy bien en las redes cableadas. La mayoría de las técnicas para entregar multi-difusión en redes cableadas se basan en árbol fuente o árbol compartido. Trabajos relacionados con este tipo de estrategias han intentado ampliar la propuesta basada en árbol compartido para proveer multi-difusión en una red móvil ad hoc.

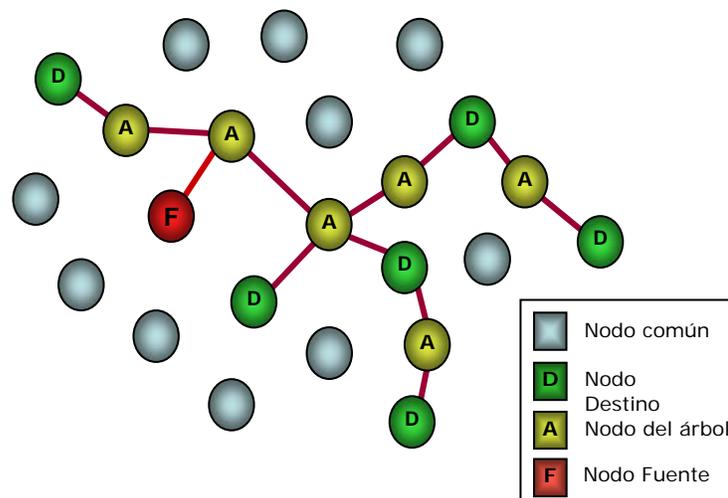


Figura 9. Árbol de multi-difusión.

La figura 9 muestra un ejemplo de un árbol de multi-difusión. Los mecanismos de multi-difusión basados en árbol se caracterizan por construir rutas óptimas entre fuente y destinos, de esta manera se obtiene una alta eficiencia en el redireccionamiento de los datos; sin embargo en escenarios de alta movilidad, donde existe alta probabilidad de cambio en la arquitectura, estos mecanismos generan una alta sobrecarga debido al mantenimiento de las rutas.

III.3.2 Mecanismos basados en malla

En contraste con los mecanismos basados en árbol, los mecanismos basados en malla pueden tener múltiples trayectorias entre la fuente y los receptores. Estos protocolos parecen superar a los protocolos basados en árbol propuestos debido a la disponibilidad de trayectorias alternas, las cuales permiten entregar mensajes a los receptores aún cuando exista ruptura de enlaces. Estos protocolos son muy robustos porque no requieren de reconfiguración de rutas.

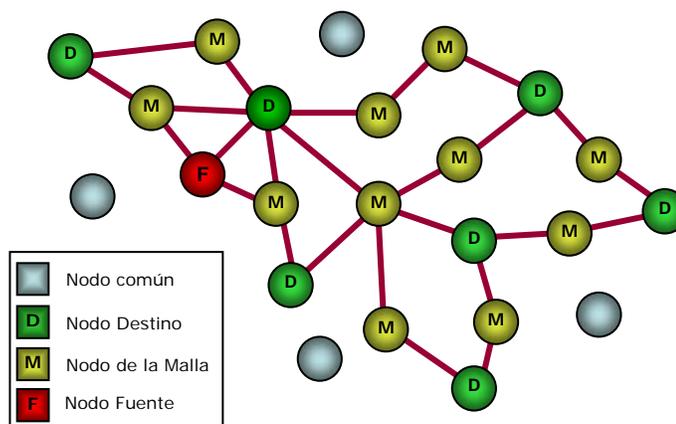


Figura 10. Estructura de una malla de multi-difusión.

La figura 10 muestra un ejemplo de una malla de distribución de tráfico de multi-difusión. Esta técnica proporciona alta robustez ante escenarios dinámicos con importante movilidad y cambios de rutas, sin embargo no son tan eficientes en el direccionamiento de datos como lo son los mecanismos basados en árbol.

III.3.3 Mecanismos basados en estructura de dorsal

Los mecanismos basados en estructura de dorsal utilizan una técnica de enrutamiento jerárquico. El enrutamiento de multi-difusión se divide en dos niveles: el enrutamiento de multi-difusión global dentro de una dorsal virtual y el tráfico de multi-difusión local de cada nodo de la dorsal a sus determinados nodos receptores.

Para un esquema basado en dorsal, un proceso de elección distribuido es conducido entre todos los nodos de la red para seleccionar un subconjunto de nodos como nodos del núcleo. La topología formada por los nodos del núcleo y las trayectorias que los conectan a la dorsal virtual, permiten el transporte de tráfico unicast y de multi-difusión. La dorsal formada tiene la propiedad de que todos sus nodos están a un salto de distancia del nodo núcleo. Un nodo núcleo y su conjunto de nodos dominados forman un clúster.

Una vez formada la dorsal virtual, la operación de multi-difusión se divide en dos niveles. El nivel de multi-difusión más bajo, que se encuentra dentro del clúster. El nivel de multi-difusión más alto utiliza una técnica de inundación dentro de la dorsal. Por ejemplo el

protocolo MCEDAR³ [Sinha et al., 1999] construye una malla dentro de la dorsal para conectar a todos los nodos núcleo.

III.3.4 Multi-difusión sin estado

Los mecanismos basados en árbol y en malla generan sobrecarga creando y manteniendo el árbol o malla de entrega con el tiempo. En una red móvil ad hoc, el movimiento frecuente de los nodos incrementa considerablemente la sobrecarga en la red debido al mantenimiento de rutas en el árbol o en la malla de entrega. Para minimizar el efecto de tal problema, se propone la multi-difusión sin estado, en donde una fuente menciona explícitamente la lista de los destinatarios en el encabezado del paquete. La multi-difusión sin estado se enfoca en grupos de multi-difusión pequeños y confía que el protocolo de enrutamiento instalado tenga la precaución de entregar los paquetes a los respectivos destinos, basados en las direcciones contenidas en el encabezado del paquete de datos [de Morais et al., 2003].

En los protocolos de multi-difusión sin estado, con la información incluida en el encabezado del paquete, cualquier nodo intermedio sabe cómo direccionar o duplicar el paquete. Aunque la información de enrutamiento del paquete junto con los datos de tráfico, harán que el tamaño del paquete crezca, la ventaja de esta técnica es que se reduce el número total de paquetes de control generados por el protocolo de enrutamiento. Por otro

³ Multicast Core-Extraction Distributed Ad hoc Routing.

lado, cuando el grupo está inactivo, no hay sobrecarga en la red por mensajes de control [Mohapatra et al., 2005].

III.3.5 Mecanismos de multi-difusión sobrepuesta

La multi-difusión sobrepuesta ha sido propuesta como una técnica alternativa para proporcionar servicios de multi-difusión en Internet. Se puede construir una infraestructura virtual de una red sobrepuesta encima del Internet físico. Cada enlace en la infraestructura virtual es un túnel unicast en la red. La capa IP proporciona un servicio unicast de mejor esfuerzo, mientras que la red sobrepuesta implementa todas las funcionalidades de multi-difusión como el mantenimiento dinámico de membresías, duplicado de paquetes y enrutamiento de multi-difusión.

Cuando la técnica de multi-difusión sobrepuesta se aplica en una red móvil ad hoc, la manera en la cual la capa sobrepuesta interactúa con la red física, es completamente diferente que la multi-difusión sobrepuesta en Internet. En una red móvil ad hoc, cada nodo actúa tanto como enrutador o como cliente. En muchos casos, podemos asumir homogeneidad en el ancho de banda entre los nodos de una red ad hoc. Mientras que en una topología de Internet, existe diferencia significativa de ancho de banda en los clientes y en los enrutadores. De manera que hay un mayor problema de eficiencia con la multi-difusión sobrepuesta en Internet, comparado con la multi-difusión de capa de red. Sin embargo, este problema no existe para la multi-difusión sobrepuesta en una red móvil ad hoc homogénea [Mohapatra et al., 2005].

III.3.6 Mecanismos de multi-difusión por ubicación asistida

En redes donde está disponible la tecnología GPS (Sistema de Posicionamiento Global), cada nodo está equipado con información de ubicación y movilidad. La técnica de enrutamiento por ubicación asistida es utilizada por protocolos unicast. Los protocolos de multi-difusión también pueden utilizar esta información para mejorar su robustez o inclusive para hacer el cálculo de direccionamiento [Mohapatra et al., 2005].

Por ejemplo, con la ayuda de GPS, el protocolo ODMRP⁴ [Lee et al., 1999] puede adaptarse al movimiento de los nodos utilizando predicción de movilidad. Utilizando información de movilidad y de la ubicación, el tiempo de expiración de la ruta puede estimarse y los receptores seleccionan a la ruta que permanecerá válida por mayor tiempo. Con el método de predicción de movilidad, las fuentes pueden reconstruir rutas anticipadamente a la ruptura. Así el protocolo es más resistente a la movilidad de los nodos.

El algoritmo LGT⁵ [Chen y Nahrsted, 2002] para grupos de multi-difusión pequeños, es también un mecanismo de multi-difusión sobrepuesta, donde los datos de multi-difusión son encapsulados en un paquete unicast y este paquete se transmite entre los miembros del grupo. Usando la información de la ubicación de los nodos miembros del grupo, el árbol de multi-difusión se construye sin el conocimiento de la topología de red.

⁴ On Demand Multicast Routing Protocol

⁵ Location Guided Tree Construction

III.3.7 Mecanismos basados en Gossip

Los mecanismos basados en *gossip* no requieren del completo conocimiento acerca de las membresías del grupo. En estos mecanismos la transmisión y recuperación de multi-difusión es realizada en ambiente punto a punto. Un miembro del grupo envía el paquete de multi-difusión más recientemente recibido a un subconjunto de miembros del grupo conocidos a través de un mensaje conocido como mensaje *gossip*. Cada mensaje *gossip* incluye información acerca de mensajes perdidos en su propio sitio. Los paquetes perdidos son recuperados cuando se recibe un mensaje *gossip* que automáticamente contiene el paquete esperado o cuando se recibe un mensaje de recuperación dedicado. Los mecanismos basados en *gossip* no garantizan una entrega confiable de todos los paquetes, sino que solo alcanzan una alta tasa de entrega de paquetes [Ouyang et al., 2005].

La estrategia *gossip*, es una forma de inundación probabilística controlada y ha sido utilizada para resolver numerosos problemas como la diseminación de noticias en la red. La idea básica de aplicar *gossip* a la multi-difusión, es para tener cada nodo miembro periódicamente “hablando” a un subconjunto aleatorio de otros miembros. Después de cada ronda de “hablar” ambos nodos *gossipers* pueden recuperar sus mensajes perdidos uno del otro. En contraste con una técnica determinística, este esquema probabilístico sobrevivirá mejor en una red ad hoc altamente dinámica puesto que es independiente de la topología de la red, su propiedad no determinística hace que se adapte mejor a las características de la red [Mohapatra et al., 2005].

III.3.8 Mecanismos híbridos.

Los protocolos que proporcionan multi-difusión en una red móvil ad hoc discutidos hasta ahora, tratan el problema de eficiencia o robustez, pero no ambos. Los mecanismos basados en árbol proporcionan alta eficiencia en el direccionamiento de los datos a expensas de baja robustez, mientras que los mecanismos basados en malla proporcionan mejor robustez (un enlace roto no requiere de reconfiguración) a expensas de alta redundancia en el direccionamiento e incrementar la carga en la red. Por lo que existe la posibilidad de que una técnica de multi-difusión híbrida pueda alcanzar mejor desempeño combinando las ventajas de los mecanismos basados en malla y en árbol [de Morais et al., 2003].

III.4 Parámetros de una red ad hoc.

Los parámetros más importantes que se tienen que tomar en cuenta para evaluar el desempeño de los mecanismos de multi-difusión son [Mohapatra et al., 2005]:

- Tamaño de la red
- Movilidad de la red
- Tamaño del grupo de multi-difusión.

III.4.1 Tamaño de la red

Debido a que existen diferentes escenarios y aplicaciones para las redes inalámbricas, el tamaño de la red puede extenderse en un rango muy amplio, desde pequeñas redes con decenas de nodos, hasta redes en gran escala con decenas de miles de nodos. Redes con un

gran número de nodos implican más retos que una red con pocos nodos, puesto que tener una red densa implica controlar problemas como la sobrecarga, acceso al medio y la cantidad de saltos que se efectúan para llegar a un destino. Si el tráfico local (i.e. tráfico dirigido para nodos de la misma red ad hoc) es dominante, el tamaño de la red no impone mucha dificultad para la multi-difusión. Los mecanismos basados en malla son más apropiados para estas condiciones, puesto que los miembros del grupo están más próximos unos de otros y así la sobrecarga de tráfico causada por la inundación en la malla se reduce.

Para el caso donde la red contiene una gran cantidad de nodos, con un grupo de multi-difusión pequeño y si los nodos miembros del grupo no están tan dispersos en el área, un mecanismo de multi-difusión sin estado funcionaría bien, comparado contra un mecanismo basado en árbol o en malla que introduciría sobrecarga por el mantenimiento de rutas y la transmisión redundante de mensajes de control. Cuando la red y el grupo de multi-difusión son grandes, especialmente cuando los miembros del grupo están dentro de clusters en varios *hot spots*, algún protocolo jerárquico podría ayudar a reducir sobrecarga por enrutamiento y transmisión.

III.4.2 Movilidad en la red

Las redes ad hoc pueden tener distintos grados de movilidad. En una red con alto grado de movilidad, donde los nodos se mueven relativamente rápido, existen cambios rápidos de topología. Por otro lado, en una red con baja movilidad, o en una red estática, los cambios de topología no son significativos.

Para una red con alta movilidad, los mecanismos de multi-difusión basados en malla superan a otros métodos. La redundancia en las trayectorias en una estructura de malla proporciona robustez contra ruptura de enlaces, sin embargo, con la redundancia de trayectorias en la estructura de malla, el periodo de actualización puede ser mayor que el requerido en protocolos basados en árbol. Por otro lado, puesto que un simple enlace roto provoca que el árbol de multi-difusión se desconecte, la carga de tráfico requerida para el mantenimiento de la estructura del árbol es considerable. Además los mecanismos de multi-difusión sobrepuesta y mecanismos sin estado tendrán pobre desempeño con un alto grado de movilidad en la red. El problema con los mecanismos de multi-difusión sobrepuesta, es que la topología virtual sobrepuesta se mantiene estática bajo la topología dinámica de la red. La eficiencia del árbol de multi-difusión será dañada significativamente con alto nivel de movilidad, problemas como congestión y desbordamiento de búfer se incrementarán y el protocolo podría fallar para entregar una porción de paquetes de datos [Lee et al., 2000]. Para los protocolos de multi-difusión sin estado, los nodos intermedios toman decisiones de reenvío de paquetes mediante peticiones del protocolo unicast instalado en la red, esto causará alta sobrecarga al mantener una gran cantidad de entradas de las tablas de enrutamiento.

III.4.3 Tamaño de grupo de multi-difusión

Además del tamaño de la red, el tamaño del grupo de multi-difusión puede ser un factor importante que afecta a las prestaciones de los mecanismos de multi-difusión. ¿Cómo

puede ser afectado el desempeño de los mecanismos, si el tamaño de grupo de multi-difusión crece o bien si existen varios grupos de multi-difusión en la red?

Cuando el tamaño de un grupo de multi-difusión crece, los mecanismos basados en árbol incurren en alto nivel de sobrecarga por mensajes de control en el mantenimiento de un árbol de multi-difusión de gran tamaño. Cuando los nodos miembros del grupo son más densos en la red, como resultado de un grupo extenso, las mallas de multi-difusión alcanzarán mejor escalabilidad. Por otro lado, los mecanismos de multi-difusión sin estado son diseñados para pequeños grupos de multi-difusión.

Si existen múltiples grupos de multi-difusión y cada grupo es relativamente pequeño, el comportamiento del desempeño será diferente. Los mecanismos basados en malla no funcionarán bien puesto que los nodos miembros del grupo están escasos en la red y la eficiencia de reenvío será más baja. Para esta situación, un mecanismo de multi-difusión sin estado trabajaría bien.

III.5 Resumen

En este capítulo se revisaron los distintos tipos de mecanismos que existen para entregar tráfico de multi-difusión, se observó que dependiendo de las características de la red hay un protocolo que se adapta a esos requerimientos, o bien, que dependiendo de la estructura de esa red, se puede diseñar un mecanismo que se adecue a tales características. Se mencionaron los parámetros que pueden afectar al desempeño del mecanismo de multi-

difusión instalado en la red y de que manera se pueden compensar. Según Viswuanat et al., [2006] el protocolo MAODV (Multicast operation of the Ad-hoc On-Demand Distance Vector) [Royer y Perkins, 2000] no tiene limitaciones en comparación con otros protocolos de su clase, además por ser el mecanismo que mejor se adapta al escenario propuesto se elige como base en este proyecto de tesis. En el siguiente capítulo se trata con mayor profundidad a este mecanismo.

Capítulo IV

MAODV

IV.1 Introducción

El protocolo de Multi-difusión en Demanda de Vector de Distancia para redes Ad hoc (MAODV) activa rutas dinámicas, auto-iniciables y multi-salto entre nodos móviles que participan o desean participar en un grupo de multi-difusión dentro de una red ad hoc. La membresía de este grupo de multi-difusión es libre de cambiarse durante el tiempo de vida de la red. MAODV habilita a los nodos móviles para establecer una conectividad tipo árbol con los miembros del grupo de multi-difusión. Los nodos móviles son capaces de responder rápidamente ante enlaces rotos en el árbol de multi-difusión, reparándolos de manera oportuna. En el caso de que una red se seccione, se forman árboles de multi-difusión de manera independiente en cada sección y los árboles del mismo grupo de multi-difusión se conectan rápidamente cuando los componentes de la red se unen.

Un rasgo distinguible de MAODV es que utiliza números de secuencia para los grupos de multi-difusión. Cada grupo de multi-difusión tiene su propio número de secuencia, el cual es inicializado por el líder de grupo de multi-difusión y es incrementado periódicamente. El

uso de estos números de secuencia permite asegurar que las rutas disponibles para alcanzar a los grupos de multi-difusión sean siempre las más actuales. Un nodo que tiene la opción de elegir entre dos rutas, siempre elige la ruta que tiene el número de secuencia mayor (i.e. más actual).

MAODV es el mecanismo de multi-difusión asociado al protocolo AODV (protocolo de enrutamiento en demanda de Vector de Distancia para redes ad hoc) [Perkins y Royer, 2003].

IV.2 Principio de operación de MAODV

Los mensajes utilizados en el mecanismo de multi-difusión MAODV son: Petición de ruta (RREQ), Respuesta de ruta (RREP), Activación Multicast (MACT), y el mensaje Hola del grupo de multi-difusión (GRPH). Los mensajes RREQ y RREP son básicamente los mismos que se utilizan en AODV [Perkins et al., 2004] excepto por ciertos procedimientos controlados por nuevas banderas. Este tipo de mensajes son transportados en paquetes UDP y con encabezado normal IP.

Mientras que los miembros del grupo de multi-difusión permanezcan conectados (dentro de un árbol de multi-difusión), MAODV no realiza ninguna acción. Cuando un nodo desea unirse a un grupo de multi-difusión o quiere encontrar una ruta hacia un grupo de multi-difusión, difunde en la red un mensaje RREQ. Cuando los mensajes RREQ son para unirse a un grupo de multi-difusión, la ruta se determina cuando este mensaje RREQ alcanza a

algún nodo que ya es parte del árbol de multi-difusión y el número de secuencia del grupo de multi-difusión contenido en su registro es al menos tan grande como que el número de secuencia contenido en el mensaje RREQ. Cuando el mensaje de petición no es para unirse al grupo de multi-difusión, sino para enviarle tráfico, cualquier nodo con una ruta actualizada hacia el árbol de multi-difusión puede responder el mensaje RREQ. Una ruta actualizada se define como un registro que aún no ha expirado en la tabla de enrutamiento de multi-difusión y cuyo número de secuencia de grupo de multi-difusión asociado debe ser al menos tan grande como el contenido dentro del mensaje RREQ. La ruta hacia el árbol de multi-difusión se hace disponible cuando se envía el mensaje de respuesta RREP hacia el nodo que generó originalmente el mensaje RREQ. Puesto que cada nodo que recibe la petición de ruta tiene una ruta en reversa hacia el nodo que necesita la ruta, el mensaje RREP puede ser enviado de regreso al nodo fuente. Una vez que el nodo fuente ha esperado el periodo de descubrimiento para recibir todos los mensajes RREP, selecciona la mejor ruta al árbol de multi-difusión y envía el mensaje de activación MACT a lo largo de esa ruta seleccionada. Este mensaje activa la ruta seleccionada.

Los nodos supervisan el estado del enlace del siguiente salto en el árbol de multi-difusión. Cuando se detecta un enlace roto, esa rama del árbol es reparada mediante la secuencia de mensajes RREQ/RREP/MACT.

A cada grupo de multi-difusión se le asocia un líder de grupo. La principal responsabilidad de este nodo líder es la inicialización y mantenimiento del número de secuencia del grupo. El líder de grupo difunde periódicamente un mensaje de Hola en toda la red, este mensaje

lleva la dirección IP del líder, el número de secuencia y la dirección del grupo de multi-difusión. Esta información se utiliza para diseminar actualizaciones en el número de secuencia de grupo a través del grupo de multi-difusión y para reparar árboles de multi-difusión.

IV.3 Tablas de enrutamiento

Los nodos que utilizan el protocolo MAODV mantienen tres tablas, las cuales son: tabla de enrutamiento, tabla de enrutamiento de multi-difusión y tabla de líder de grupo. La información de la tabla de enrutamiento debe almacenar incluso las rutas efímeras, como las rutas en reversa almacenadas para alcanzar a los nodos que generan mensajes RREQ. El protocolo MAODV usa los siguientes campos que forman parte de los registros de la tabla de enrutamiento, los cuales se basan en la tabla de enrutamiento definida en el RFC 3561 para AODV [Perkins et al., 2003]:

- Dirección IP destino
- Número de secuencia del destino
- Contador de saltos (número de saltos para alcanzar el destino)
- Contador del último salto
- Siguiendo salto
- Interfaz del siguiente salto
- Lista de precursores
- Tiempo de vida
- Banderas

La siguiente información es almacenada en cada registro dentro de la tabla de enrutamiento de multi-difusión (MRT), para las rutas de árboles de multi-difusión:

- Dirección IP del grupo de multi-difusión
- Dirección IP del líder de grupo de multi-difusión
- Número de secuencia del grupo de multi-difusión
- Siguietes saltos
- Contador de saltos del siguiente miembro del grupo de multi-difusión
- Contador de saltos hacia el líder de grupo de multi-difusión

El campo de “siguiente salto” está ligado a una lista de estructuras, cada una de las cuales contiene los siguientes campos:

- Dirección IP del siguiente salto
- Interfaz del siguiente salto
- Dirección del enlace
- Bandera activa

La dirección del enlace es relativa a la ubicación del nodo líder de grupo; la cual puede ser definida como enlace de subida y enlace de bajada. La dirección del enlace de subida (*upstream*) se utiliza para especificar que el siguiente salto es hacia el nodo líder, mientras que la dirección de enlace de bajada (*downstream*) se utiliza para especificar que el siguiente salto se aleja del nodo líder. Un nodo en el árbol de multi-difusión debe tener necesariamente un solo enlace de subida. La dirección IP del siguiente salto (enlace

upstream o *downstream*) no debe usarse para retransmitir mensajes, sino hasta que la ruta se active mediante el mensaje MACT. El campo *interfaz del siguiente salto* dentro de la tabla de enrutamiento y dentro de la tabla de multi-difusión (MRT) se usa para guardar la información sobre la interfaz que se usa para alcanzar a ese siguiente salto, esta información es de importancia para cuando se tienen múltiples interfaces.

Los nodos también mantienen una tabla *líder de grupo*, la cual es una asociación entre grupos de multi-difusión y sus respectivos líderes de grupo. Los campos de la tabla *líder de grupo* son:

- Dirección IP del grupo de multi-difusión
- Dirección IP del líder de grupo

IV.4 Terminología MAODV

En esta sección se definen terminologías utilizadas en MAODV:

Líder de grupo de multi-difusión:

Es un nodo miembro de un grupo de multi-difusión dado y típicamente es el primer nodo que se une a un árbol de multi-difusión en una porción de red. Este nodo es el responsable de inicializar y mantener el número de secuencia del grupo de multi-difusión.

Tabla líder de grupo:

Es la tabla donde los nodos ad hoc guardan la información de cada grupo de multi-difusión y de su correspondiente líder de grupo. Hay un registro en la tabla *líder de grupo* por cada grupo de multi-difusión que exista en la red, cuando un nodo recibe un mensaje hola de grupo (GPRH) actualiza los registros de su tabla *líder de grupo*.

Árbol de multi-difusión:

El árbol contiene a todos los nodos que son miembros del grupo de multi-difusión y contiene a todos los nodos que se necesitan para conectar a los miembros del grupo de multi-difusión.

Tabla de enrutamiento de multi-difusión (MRT):

Es la tabla donde los nodos ad hoc guardan información de enrutamiento (incluyendo siguientes saltos) de varios grupos de multi-difusión.

Ruta en reversa:

Es una ruta construida para redirigir los mensajes de respuesta de ruta (RREP) hacia la fuente desde el destino, o bien desde un nodo intermedio que ya tenga una ruta hacia el destino.

Dirección de enlace de subida (*upstream*):

Un nodo establece un enlace con cada vecino que tiene, el enlace de subida (*upstream*), es el enlace que tiene con un vecino que esta más cerca del nodo líder del grupo. Es decir,

cuando en la tabla de enrutamiento el número de saltos al nodo líder disminuye. La figura 11 muestra un enlace de subida (*upstream*).

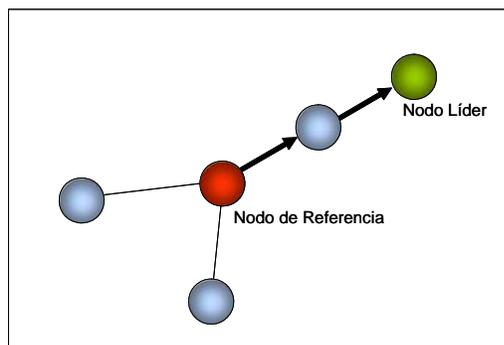


Figura 11. Dirección de enlace de subida (*upstream*).

Dirección de enlace de bajada (*downstream*):

Un nodo establece un enlace con cada vecino que tiene, el enlace de bajada (*downstream*), es el enlace que tiene con los vecinos que están más lejos del nodo líder del grupo. Es decir cuando en la tabla de enrutamiento el número de saltos al nodo líder se incrementa. La figura 12 muestra un enlace de bajada (*downstream*).

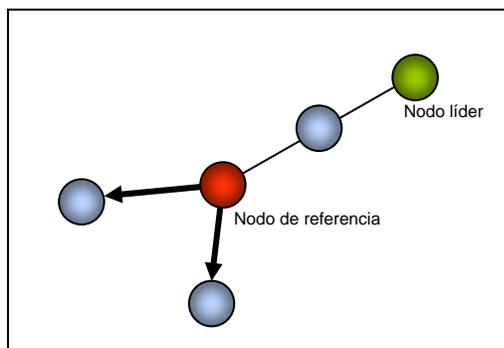


Figura 12. Dirección de enlace de bajada (*downstream*).

IV.5 Formato de los mensajes de control en MAODV

En esta sección se describen los formatos de los mensajes de control que usa el protocolo MAODV: RREQ, RREP, MACT y GRPH.

IV.5.1 Formato del mensaje de petición de ruta (RREQ)

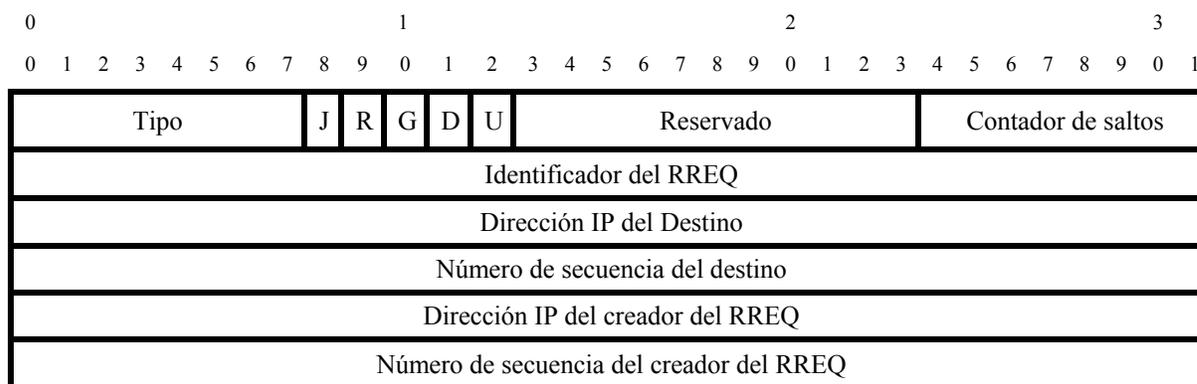


Figura 13. Formato de mensaje RREQ.

La figura 13 muestra el formato del mensaje que se emplea para enviar la petición de la ruta. Los campos del mensaje se detallan a continuación.

- Tipo: este campo se define con valor 1 para especificar que se trata de un mensaje RREQ.
- Bandera J (join-uni3n): esta bandera se utiliza cuando un nodo desea unirse a un grupo de multi-difusi3n.
- Bandera R (reparar): esta bandera se utiliza cuando un nodo quiere iniciar una reparaci3n para reconectar dos secciones de 3rbol de multi-difusi3n.

- Bandera G (RREP gratuito): indica si un RREP gratuito debe ser enviado al nodo especificado en el campo de dirección IP destino.
- Bandera D (solo destino): indica que solo el destino puede responder al mensaje RREQ.
- Bandera U (número de secuencia desconocido): indica que el número de secuencia del destino es desconocido.
- Reservado: se envía como cero y se ignora en recepción.
- Contador de saltos: es el número de saltos desde nodo que generó el RREQ hasta el nodo que responde con el RREP.
- Identificador del RREQ: es un número de secuencia que identifica a los mensajes RREQ cuando llevan conjuntamente la dirección IP del nodo que generó el RREQ.
- Dirección IP del destino: dirección IP del destino para el cuál la ruta fue descubierta.
- Número de secuencia del destino: es el número de secuencia más actual que recibe el destino desde el nodo que generó el mensaje RREQ.
- Dirección IP del nodo creador: es la dirección IP del nodo que crea el mensaje de petición de ruta RREQ.
- Número de secuencia del nodo creador: es el número de secuencia actualizado que se usa en la entrada de la ruta que apunta hacia el nodo que creó la petición de ruta.

IV.5.2 Formato del mensaje de respuesta de ruta (RREP)

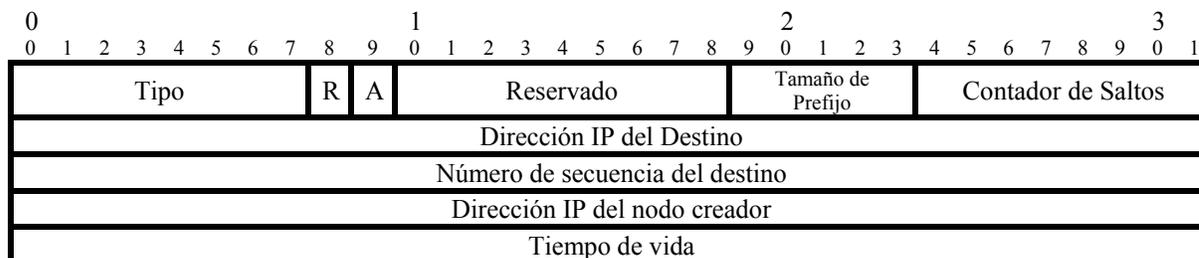


Figura 14. Formato del mensaje RREP.

La figura 14 muestra el formato del mensaje que se emplea para enviar la respuesta sobre la petición de la ruta. Los campos del mensaje se detallan a continuación:

- Tipo: este campo se define con valor 2 para especificar que es un mensaje RREP.
- Bandera R (reparación): se activa cuando un nodo responde a una petición de reparación (RREQ-R), cuando dos secciones del árbol de multi-difusión se desconectaron y se desean unir.
- Bandera A (reconocimiento requerido): es utilizada cuando en la red existen enlaces unidireccionales.
- Reservado: se envía como cero y se ignora en recepción.
- Tamaño del prefijo: especifica que el siguiente salto indicado puede usarse por cualquier nodo con el mismo prefijo de enrutamiento.
- Contador de saltos: es el número de saltos que hay del nodo que creó el RREQ hasta el miembro del árbol de multi-difusión que responde con un RREP.

- Dirección IP del destino: es la dirección IP del nodo destino para el cual se creó la ruta.
- Número de secuencia del destino: es el número de secuencia asociado a la ruta.
- Dirección IP del nodo creador: es la dirección IP del nodo que crea la petición de ruta y para quién fue creada la ruta.
- Tiempo de vida: es el tiempo en milisegundos en el que los nodos que reciben el mensaje RREP consideran a la ruta como válida.

IV.5.3 Formato del mensaje de activación de multi-difusión (MACT).

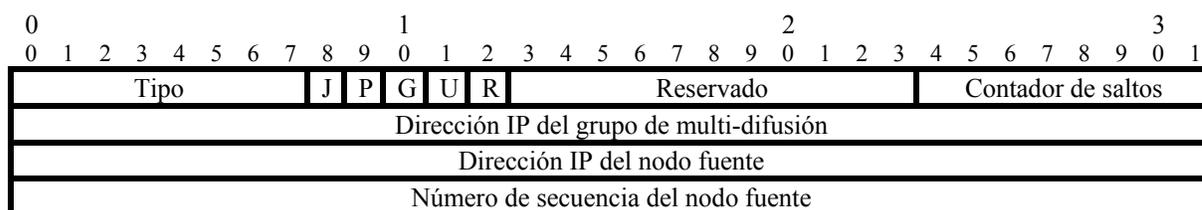


Figura 15. Formato del mensaje de activación de multi-difusión.

La figura 15 muestra el formato del mensaje que se emplea para la activación de multi-difusión, los campos contenidos en este mensaje se detallan a continuación:

- Tipo: este campo se define con valor 5 para especificar que se trata de un mensaje MACT.
- Bandera J (unión): se activa cuando un nodo se va a unir a un grupo de multi-difusión y ya ha recibido el mensaje de respuesta de ruta RREP.

- Bandera P (podar): se activa cuando un nodo quiere “podarse” de un árbol de multi-difusión.
- Bandera G (líder de grupo): se activa cuando un nodo miembro del árbol de multi-difusión falla en la reparación de un enlace roto y le indica al nodo que recibe este mensaje que debe convertirse en el nuevo líder de grupo de multi-difusión.
- Bandera U (actualización): se activa cuando un nodo miembro del árbol de multi-difusión ha reparado un enlace roto y actualiza la nueva distancia desde el nodo líder de grupo.
- Bandera R (reinicio): se activa cuando un nodo miembro del árbol de multi-difusión se ha reiniciado y ha perdido toda información sobre el grupo de multi-difusión.
- Reservado: se envía como cero y se ignora en recepción.
- Contador de saltos: es la distancia al nodo transmisor desde el nodo líder de grupo de multi-difusión. Se usa solo cuando la bandera U está activa de otra manera se envía como cero.
- Dirección IP del grupo de multi-difusión: es la dirección IP del grupo de multi-difusión para el cuál la ruta fue provista.
- Dirección IP de la fuente: es la dirección IP del nodo que envía el tráfico.
- Número de secuencia de la fuente: es el número de secuencia actualizado para la información de la ruta generada por la fuente de la petición de ruta.

IV.5.4 Formato del mensaje de Hola de grupo (GRPH)

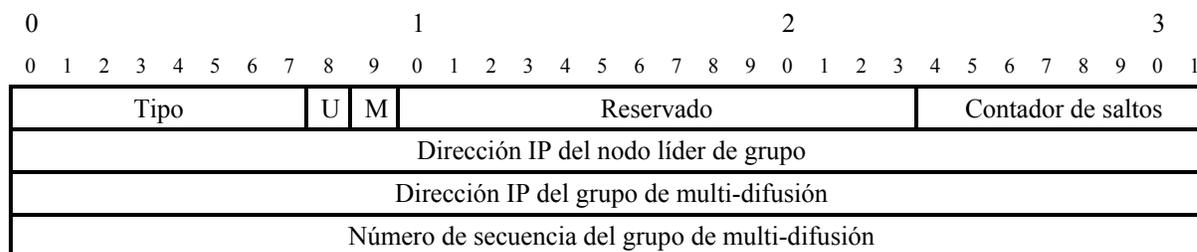


Figura 16. Formato del mensaje de hola de grupo.

La figura 16 muestra el formato del mensaje de hola de grupo que se usa para el mantenimiento del árbol de multi-difusión, los campos contenidos en este mensaje se detallan a continuación:

- Tipo: este campo se define con valor de 6 para especificar que es un mensaje GRPH.
- Bandera U (actualización): se activa cuando hay algún cambio en la información del nodo líder de grupo.
- Bandera M (fuera del árbol): es activada por un nodo que recibe el mensaje de hola de grupo y no pertenece al árbol de multi-difusión.
- Reservado: se envía como cero y se ignora en recepción.
- Contador de saltos: es el número de saltos por los que el mensaje ha pasado. Se usa para que los nodos miembros del árbol tengan actualizada su distancia hacia el nodo líder.
- Dirección IP del grupo de multi-difusión: es la dirección IP del grupo de multi-difusión.

- Número de secuencia del grupo de multi-difusión: es el número de secuencia actualizado asociado al grupo de multi-difusión.

IV.6 Descripción general del funcionamiento del MAODV.

El protocolo MAODV utiliza un esquema convencional basado en árbol para la entrega de multi-difusión. Además de la tabla de enrutamiento, cada nodo utiliza una tabla de enrutamiento de multi-difusión (MRT). Un nodo agrega nuevos registros en la tabla MRT después de que se incluye en la ruta para un grupo de multi-difusión. En cada registro guarda la dirección IP del grupo de multi-difusión, la dirección IP del nodo líder de grupo, número de secuencia de grupo y próximos saltos (vecinos del árbol de multi-difusión).

Cada grupo de multi-difusión necesita además su propio número de secuencia para indicar que una ruta de multi-difusión es reciente, la cuál es mantenida por el nodo líder de grupo. Cuando un nodo A desea unirse a un grupo de multi-difusión G, lo primero que se necesita es una ruta a tal grupo. Para descubrir esta ruta, el nodo A difunde un mensaje RREQ con la dirección IP del grupo de multi-difusión en toda la red. El mensaje de petición enviado por el nodo A es muy similar al empleado para rutas unicast, la diferencia es que lleva activa la bandera J, que indica que el nodo A desea unirse a un grupo de multi-difusión.

IV.6.1 Uniéndose a un grupo de multi-difusión.

Supongamos que el nodo A es el primer nodo en unirse al grupo G. En este caso el nodo A no recibirá respuesta de ruta y luego de cierto tiempo de espera el nodo A creará un nuevo grupo de multi-difusión y se declarará como líder de grupo.

Supongamos que otro nodo (nodo B) quiere unirse al mismo grupo G, el nodo B envía el mensaje RREQ-J con la dirección IP del grupo de multi-difusión, el nodo A recibe este mensaje y envía un mensaje RREP para crear la ruta, en seguida el nodo B envía el mensaje de activación MACT al nodo A para activar esa ruta y cada nodo que retransmite este mensaje de activación se convierte en miembro del árbol de multi-difusión. Cuando nuevos nodos desean unirse al grupo de multi-difusión G, éstos enviarán sus propios mensajes RREQ-J, en este caso cualquier miembro del árbol de multi-difusión puede responder al mensaje RREQ-J, por lo que es posible que cada nuevo nodo reciba más de un solo mensaje RREP, el nuevo nodo selecciona la mejor ruta (i.e. la más corta) hacia el árbol de multi-difusión, el nuevo nodo envía su mensaje de activación MACT por la ruta seleccionada para activar la ruta y convertirse un nuevo miembro del grupo de multi-difusión, cada nodo que retransmite este mensaje MACT se convierte también en parte del árbol de multi-difusión.

Los nodos que retransmiten los mensajes MACT se convierten en miembros del árbol de multi-difusión, no necesariamente miembros del grupo de multi-difusión, en este caso los nodos solo actúan como enrutadores para dar conectividad a cada miembro del grupo en el

árbol; si estos nodos quieren unirse al grupo de multi-difusión solo se dan de alta como tales y cambian el registro correspondiente de su tabla MRT.

IV.6.2 Difusión del tráfico a través del árbol de multi-difusión.

Cuando un nodo desea enviar tráfico a un grupo de multi-difusión, primero tiene que descubrir una ruta hacia el árbol de difusión. Difunde un mensaje RREQ en toda la red, este mensaje puede ser respondido por cualquier nodo miembro del árbol de difusión o por cualquier nodo que tenga una ruta actualizada hacia el árbol enviando un mensaje RREP.

El tráfico de multi-difusión es entregado al nodo miembro del árbol más próximo a la fuente y éste se encarga de entregar el tráfico hacia el resto del árbol. Cada nodo miembro del árbol retransmite los datos a sus vecinos a un salto (miembros del árbol) excepto al nodo por el que le llegó el tráfico, de manera que los datos sean entregados a cada miembro del grupo de multi-difusión. Si la fuente se mueve y hay cambios de ruta, la fuente busca nuevamente al árbol mediante un mensaje RREQ, y una nueva ruta se crea hacia el árbol, siempre encontrando al nodo miembro del árbol más cercano a la fuente (i.e. menor número de saltos). Si existen varias fuentes enviando tráfico a un mismo grupo de multi-difusión, cada fuente se conecta al árbol con distintos miembros, no necesariamente con un nodo común (raíz) como en los árboles compartidos en protocolos para redes cableadas.

IV.6.3 Revocación de la membresía.

Un nodo miembro del grupo de multi-difusión, incluyendo el nodo líder de grupo, puede revocar su membresía cuando lo desee. Si es el nodo líder quien deja la membresía, entonces éste cambia su identidad de miembro a enrutador y un nuevo nodo líder debe ser seleccionado. Si el nodo que revoca su membresía no es nodo líder, primero se descarta como miembro cambiando el registro de su tabla MRT, luego revisa si tiene algún nodo en enlace de bajada. Si tiene al menos un nodo debe permanecer como parte del árbol para seguir dando conectividad. Si no tiene nodos se poda del árbol de multi-difusión.

El nodo que deja al grupo y al árbol de multi-difusión debe actualizar su tabla MRT para cancelar los registros de la dirección del grupo de multi-difusión, luego procede a enviar un mensaje MACT con la bandera P activa (MACT-P) al nodo en enlace de subida para informarle que no será más parte del árbol. Si el nodo que recibe este mensaje MACT-P no es miembro del grupo de multi-difusión y no tiene más nodos en enlace de bajada, se poda también del árbol, el nodo envía un nuevo MACT-P a su nodo en enlace de subida. Este proceso se sigue hasta que el nodo que recibe el mensaje MACT-P no puede dejar de ser parte del árbol de multi-difusión.

IV.6.4 Mantenimiento del árbol de multi-difusión.

El mantenimiento del árbol de multi-difusión es más complicado que el mantenimiento de rutas en transmisión unicast. El mantenimiento incluye la propagación periódica del mensaje hola de grupo (GRPH), el mantenimiento de la conectividad con el nodo vecino, la

selección del líder de grupo, la revocación de membresías y la fusión de árboles con la misma dirección de grupo de multi-difusión.

IV.6.5 Propagación periódica del mensaje hola de grupo (GRPH).

El líder de grupo debe difundir periódicamente un mensaje de hola de grupo (GRPH) en toda la red para indicar la existencia de un grupo de multi-difusión y su estado actual. Cuando un nodo recibe el mensaje GRPH, éste procede a actualizar su tabla *líder de grupo* para registrar al nodo líder y la ruta hacia él.

Un nodo que es parte del árbol y recibe un mensaje GRPH de su nodo en enlace de subida puede usarlo para actualizar su número de secuencia del grupo, la distancia actual hacia el nodo líder de grupo y el nodo líder actual. La propagación de este mensaje GRPH será de enlace de subida a enlace de bajada, paso a paso a lo largo de la estructura del árbol y por el resto de la red. Si un nodo que es parte del árbol recibe un mensaje GRPH de algún nodo en enlace de bajada, primero revisa la información del nodo líder de grupo guardada en su tabla MRT, si es la misma información que la contenida en el mensaje GRPH, lo descarta y el nodo espera por el próximo GRPH desde su nodo en enlace de subida. Si la información del nodo líder contenida en su tabla MRT no corresponde a la información que lleva el mensaje GRPH, existe entonces otro árbol con la misma dirección de grupo multi-difusión y diferente líder de grupo en la red, entonces estos dos árboles pueden ser conectados usando un RREQ con la bandera R activada. La fusión de árboles de multi-difusión con la misma dirección es iniciada por el nodo miembro del árbol que tenga al nodo líder con la

dirección más pequeña que la dirección de líder indicada en el mensaje GRPH que recibió, si la dirección de nodo líder que tiene es más grande que la indicada en el GRPH, descarta el mensaje.

IV.6.6 Selección de nuevo líder de grupo.

Un nuevo líder de grupo debe ser seleccionado cuando se ha partido el árbol o bien cuando el nodo líder de grupo revoca su membresía. Cuando una partición ocurre, si el nodo que quedó en la partición es miembro del grupo, éste debe convertirse en nodo líder, pues sus nodos vecinos están en enlace de bajada, ya que el enlace de subida fue roto; por otro lado, si no es miembro del grupo obliga a sus vecinos miembros del grupo a que alguno sea el nuevo líder de grupo. Si este nodo tiene a un solo un nodo en enlace de bajada cancela las entradas para este grupo en su tabla MRT, indicando que no pertenece más al árbol de multi-difusión y envía un mensaje MACT-P para indicar que deja el árbol y que el árbol necesita un nodo líder. Si el nodo tiene más nodos en enlace de bajada, selecciona a uno, cambia su dirección de enlace de bajada a enlace de subida y envía un mensaje MACT con la bandera de líder de grupo activada (MACT-GL) indicando que es una rama más del árbol y que el árbol necesita un nuevo líder de grupo. Entonces, el nodo en enlace de bajada puede recibir un mensaje MACT-P o MACT-GL de su nodo en enlace de subida. Cuando el nodo recibe el mensaje MACT-P remueve su dirección de enlace de subida de su tabla MRT. Cuando el nodo recibe el mensaje MACT-GL cambia su dirección de enlace de subida a enlace de bajada. De esta forma, si el nodo es miembro del grupo de multi-difusión, se convierte en el nuevo nodo líder de grupo, si no lo es, el procedimiento se

repite hasta que un nodo miembro del grupo es alcanzado y se convierta en el nuevo líder de grupo.

Una vez que el nuevo líder de grupo es seleccionado, éste comienza el mantenimiento del árbol con la difusión periódica del mensaje GRPH en toda la red. El nodo líder también enviará un mensaje GRPH con la bandera U activa, pero solamente a los nodos de su árbol para que actualicen su tabla MRT.

IV.7 Resumen

Este capítulo describe las principales características del protocolo de multi-difusión MAODV. Este protocolo, será utilizado como parte de la arquitectura de red propuesta y será modificado para lograr la interoperabilidad con el protocolo DVMRP para redes cableadas. Lo más importante de este capítulo es resaltar el uso de los cuatro principales mensajes de control que son utilizados por el protocolo MAODV: Petición de unión (RREQ-J), respuesta de unión (RREQ), mensaje de activación de ruta (MACT) y el hola de grupo (GRPH).

Capítulo V

INTEROPERABILIDAD ENTRE MAODV Y DVMRP

V.1 Introducción

En este capítulo se describe el principio de funcionamiento del mecanismo de interoperabilidad propuesto en este proyecto, que consta de la integración de los dos protocolos seleccionados, el protocolo DVMRP para redes cableadas y el protocolo MAODV para redes inalámbricas ad hoc. También se describen las modificaciones que se hicieron en los protocolos para conseguir que trabajen juntos, así como las modificaciones hechas en el Enrutador de Frontera, junto con la arquitectura de red elegida.

V.2 Consideraciones

En la arquitectura propuesta se considera el siguiente escenario:

- a) Se manejan nodos cableados de los cuales algunos son enrutadores y otros son terminales de usuario.

- b) Se manejan dos tipos de nodos inalámbricos, los que serán destinados a funcionar solo como enrutadores inalámbricos y los nodos inalámbricos que serán destinados a ser terminales de usuario (e.g. Laptops). La diferencia entre estos dispositivos es que los nodos inalámbricos que serán enrutadores, tendrán un alcance de 150 m y serán estáticos. Por otro lado, los nodos que serán terminales de usuario tendrán un alcance de 40 m y serán móviles, éstos serán los únicos que podrán ser nodos receptores de tráfico de multi-difusión.
- c) Se maneja un solo nodo con 2 interfaces: una cableada y una inalámbrica, que será designado como enrutador de frontera.

V.3 Enrutador de Frontera

El enrutador de frontera es un nodo que actúa como puerta de enlace (gateway), y se encuentra en la frontera entre la red ad hoc y la red cableada. El enrutador de frontera tiene la capacidad de manejar tanto el protocolo DVMRP como el protocolo MAODV, y tiene la tarea principal de redireccionar el tráfico de la parte cableada a la parte inalámbrica, o viceversa.

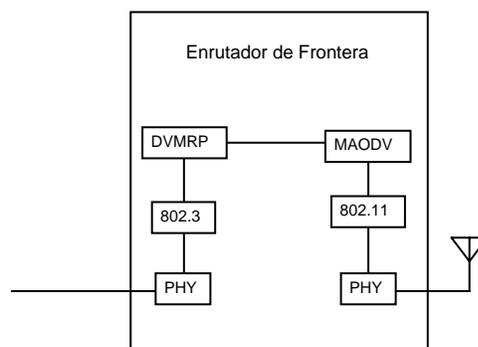


Figura 17. Enrutador de frontera.

En la arquitectura de red que se considera en este trabajo, el nodo fuente que genera el tráfico de multi-difusión se encuentra en la red cableada. De tal forma que el nodo portal actúa como receptor de tráfico en el protocolo DVMRP y actúa como fuente de tráfico en el protocolo MAODV. Este nodo tiene la capacidad de filtrar los mensajes de control generados en la parte cableada para evitar inundar la red inalámbrica; de igual forma, restringe la propagación de los mensajes de control generados en la red inalámbrica para evitar que se propaguen hacia la red cableada.

V.4 Funcionamiento del mecanismo de interoperabilidad

Para describir el funcionamiento del mecanismo de interoperabilidad, es necesario dividir el procedimiento en dos secciones, una describiendo lo que ocurre en la parte cableada con el protocolo DVMRP y la otra sección corresponde a la parte inalámbrica, describiendo lo que ocurre con el protocolo MAODV.

V.4.1 Interoperabilidad en la parte cableada

El protocolo DVMRP es un protocolo iniciado por fuente, es decir, la fuente inicia la construcción del árbol de multi-difusión, enviando las tablas de enrutamiento hacia todos los enrutadores DVMRP. La fuente envía el tráfico de multi-difusión a todos los enrutadores, de esa manera llega hasta todas las subredes, las ramas del árbol que no estén activas, es decir, las ramas que no contengan terminales que se interesen por el tráfico de multi-difusión se podarán del árbol mediante el mensaje *prune*. La figura 18 muestra cómo se inicia la inundación de tráfico de multi-difusión, partiendo de la fuente.

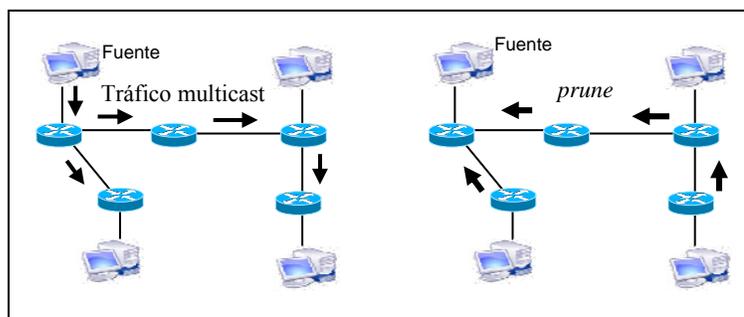


Figura 18. La fuente envía información, las ramas inactivas se podan.

La fuente de tráfico envía periódicamente la información del grupo de multi-difusión a toda la red y de nueva cuenta las ramas inactivas se podan, pero si existe una rama con al menos una terminal interesada en el tráfico de multi-difusión, el enrutador asociado a esta terminal envía el mensaje *graft* y se construye el árbol de multi-difusión. Si existen más terminales interesadas, los enrutadores asociados a estas terminales envían el mensaje *graft* para unirse al grupo de multi-difusión y agregar nuevas ramas al árbol. La figura 19 muestra cómo las terminales envían un mensaje IGMP de unión y los enrutadores asociados envían el mensaje *graft* para injertar una nueva rama al árbol de distribución.

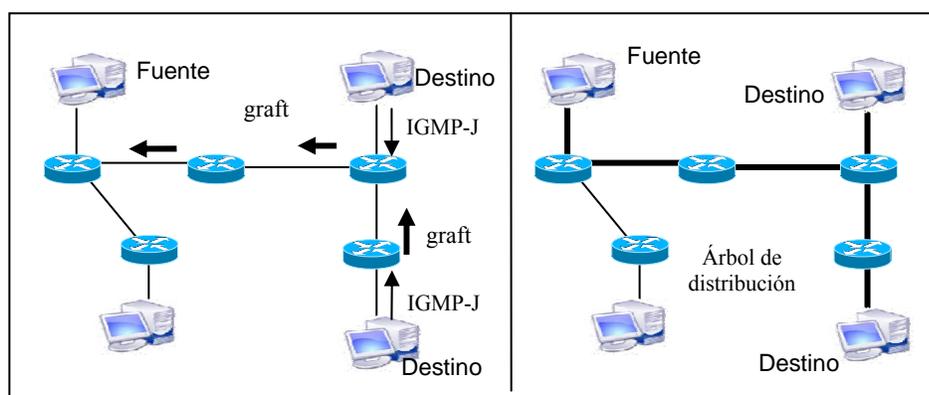


Figura 19. Destinos envían mensaje *graft* y se crea el árbol de distribución.

A grandes rasgos este es el funcionamiento del protocolo DVMRP. En la propuesta que se presenta, este funcionamiento del protocolo DVMRP no se modifica. La única diferencia es que el enrutador de frontera no retransmite la información de las tablas de enrutamiento, ni mensajes de control de multi-difusión del protocolo DVMRP hacia los enrutadores inalámbricos conectados a él. La figura 20 muestra al enrutador de frontera recibiendo mensajes de control de la red cableada, pero no los retransmite a los enrutadores inalámbricos.

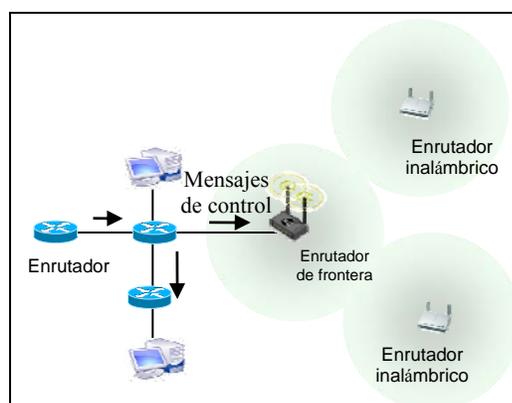


Figura 20. El enrutador de frontera no retransmite tráfico no deseado.

V.4.2 Interoperabilidad en la parte inalámbrica

A diferencia del protocolo DVMRP, el protocolo MAODV es un mecanismo de multi-difusión que es iniciado por destinos, es decir, la construcción del árbol de difusión es iniciada por los destinos interesados en formar un grupo de multi-difusión. El proceso se inicia con el primer nodo móvil que se quiere unir a un grupo de multi-difusión, este nodo envía un mensaje RREQ-J (bandera de unión activa), con la información de su tabla de enrutamiento, y su tabla de enrutamiento de multi-difusión (MRT). Este nodo propone la dirección inicial del grupo de multi-difusión y el mensaje RREQ-J es entregado en primera

instancia a todos sus nodos vecinos, luego es difundido en broadcast por toda la red. La figura 21 muestra como el nodo interesado en pertenecer a un grupo de multi-difusión envía el mensaje RREQ-J, y luego cómo es enviado a toda la red.

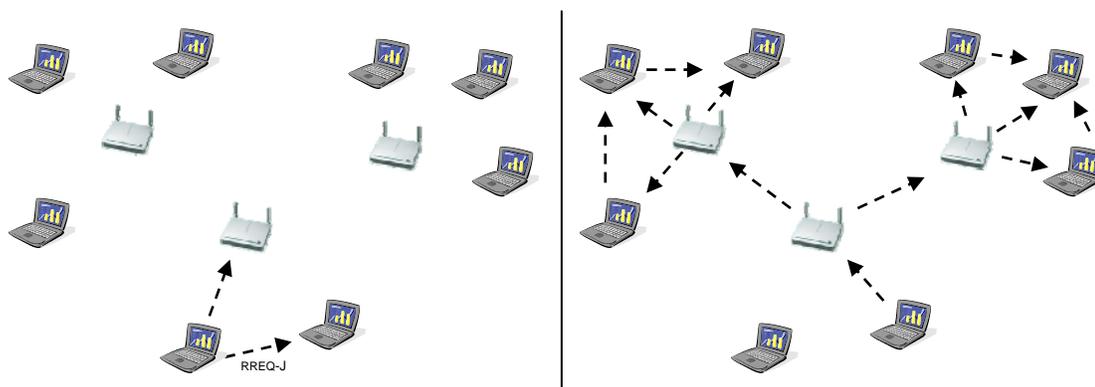


Figura 21. Nodo móvil inicia proceso de unión, se difunde el RREQ-J en toda la red.

El nodo que envió el mensaje de petición de unión RREQ-J no recibirá ninguna respuesta de ruta RREP, puesto que no existe algún grupo de multi-difusión, después de 2 intentos sin tener respuesta, este nodo cambia sus tablas y se da de alta como miembro del grupo de multi-difusión y además se convierte en el líder de grupo de multi-difusión. La figura 22 muestra al primer nodo miembro del nuevo grupo de multi-difusión.

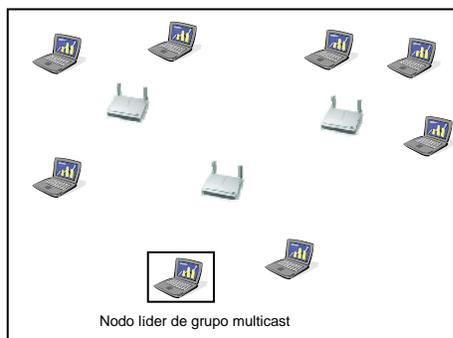


Figura 22. Primer nodo miembro del grupo de multi-difusión.

Una vez que se ha creado un grupo de multi-difusión y se tiene un líder de grupo de multi-difusión, el nodo líder de grupo tiene la responsabilidad de darle mantenimiento al árbol de multi-difusión, que hasta este momento consta de solo un nodo. Para tal efecto, el nodo líder difunde periódicamente el mensaje de hola de grupo (GRPH), para difundir la información sobre la existencia de un grupo de multi-difusión; este mensaje se difunde en toda la red, de manera que otros nodos conocerán la dirección del grupo de multi-difusión y conocerán la dirección IP del nodo líder del grupo de multi-difusión. En la figura 23 se muestra al nodo líder de grupo propagando el mensaje GRPH a toda la red.

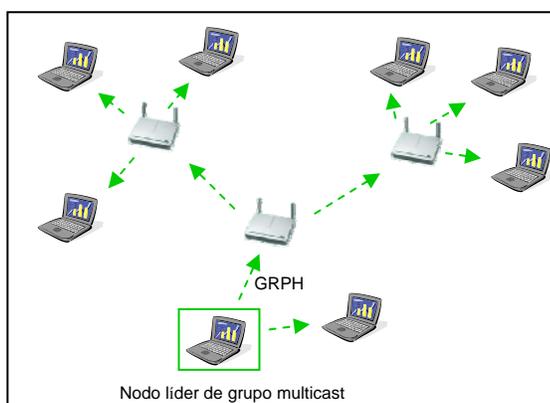


Figura 23. Nodo líder difunde mensaje GPRH.

Cuando el Enrutador de Frontera recibe el primer GPRH, se entera de que existe un grupo de multi-difusión listo para recibir tráfico. El Enrutador de Frontera envía un mensaje *graft* por la interfaz cableada hasta el enrutador DVMRP que sea parte del árbol de difusión en la parte cableada. Cuando este enrutador recibe el mensaje *graft* comienza a enviar tráfico de multi-difusión hasta el Enrutador de Frontera y el enrutador de frontera dirige el tráfico de multi-difusión hacia el grupo de multi-difusión en la red inalámbrica ad hoc. En la figura

24 se muestra a un enrutador inalámbrico enviando el primer mensaje GRPH originado por el nodo líder de grupo al enrutador de frontera, el enrutador de frontera al recibir éste mensaje lo interpreta como un mensaje IGMP de unión y envía el mensaje *graft* para injertar una nueva rama al árbol de distribución en la red cableada.

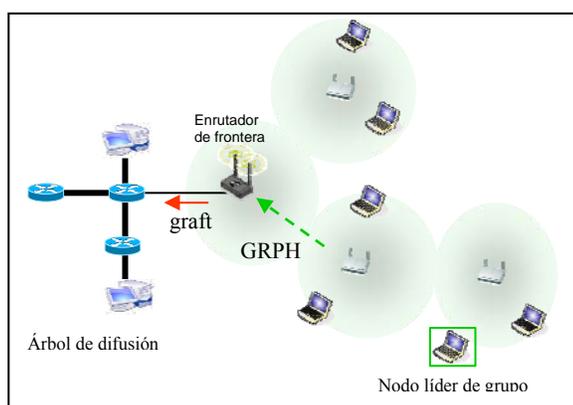


Figura 24. Enrutador recibe el primer GPRH y envía el mensaje *graft* a la red cableada.

El enrutador de frontera envía un mensaje RREQ con la dirección del grupo de multi-difusión indicando también la dirección IP del nodo líder de grupo, de manera que cualquier nodo miembro del árbol de multi-difusión le responderá y de esta forma se podrá enviar el tráfico de multi-difusión en la red inalámbrica. Como el árbol de difusión está formado solamente por el nodo líder hasta este momento, el mensaje RREQ llega hasta el nodo líder y éste responde con el respectivo mensaje RREP. Ya establecida la ruta entre el enrutador de frontera y el árbol de multi-difusión se puede iniciar la recepción de tráfico de multi-difusión desde una fuente externa a la red ad hoc. La figura 25 muestra la conexión establecida entre la red cableada y la red inalámbrica, el tráfico de multi-difusión originado por un servidor en la red cableada, es entregado a un grupo de receptores en la red ad hoc.

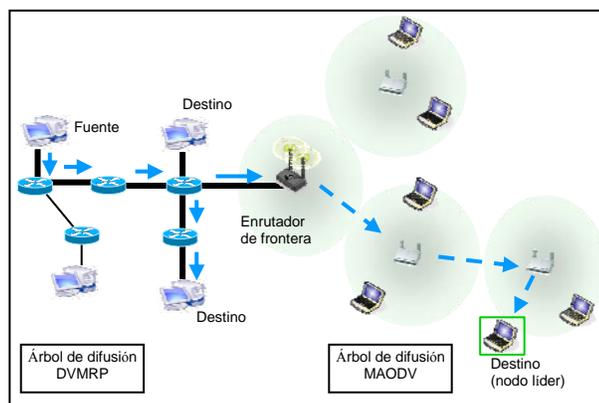


Figura 25. El Entrador de frontera realiza la conexión y el tráfico de multi-difusión llega a la red ad hoc.

Cuando más nodos estén interesados en recibir tráfico de multi-difusión, enviarán un mensaje RREQ-J con la dirección del grupo multi-difusión al que se quieren unir, los nodos miembros más cercanos al nodo que realizó la solicitud, envían la respuesta a la petición con el mensaje RREP, después, el nodo interesado envía el mensaje de activación MACT eligiendo la mejor ruta para unirse al grupo y recibir tráfico de multi-difusión.

V.4.3 Proceso de revocación de membresía

El tráfico de multi-difusión se entregará mientras exista al menos un miembro del grupo solicitándolo. Cuando un nodo ya no quiere pertenecer a un grupo de multi-difusión, envía un mensaje MACT-P que indica que desea podarse del árbol; en la parte cableada es muy similar: la terminal que desea revocar su membresía envía el mensaje IGMP de liberación hacia el enrutador al que esté conectado para indicar que deja de ser miembro del grupo de multi-difusión.

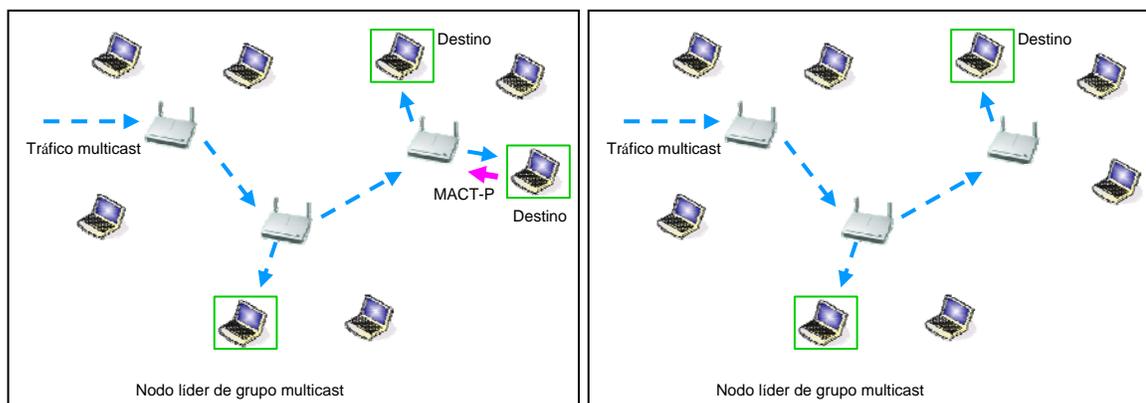


Figura 26. Proceso de revocación de membresía para la red inalámbrica ad hoc.

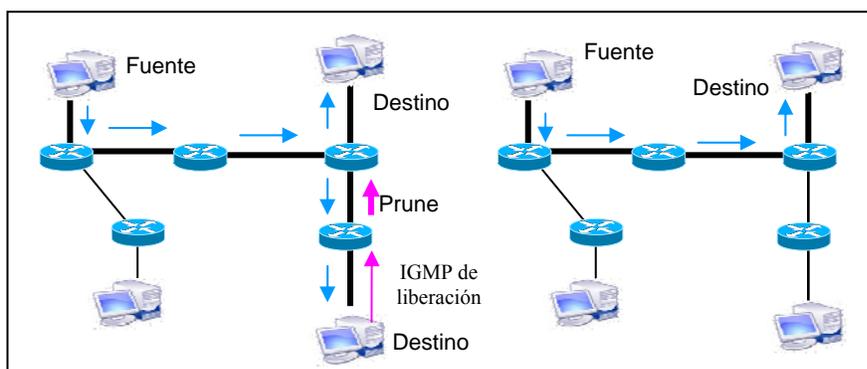


Figura 27. Proceso de revocación de membresía para la red cableada.

La figura 26 muestra el proceso de revocación de membresía en el mecanismo MAODV, el nodo que se libera del grupo envía el mensaje MACT-P y deja de recibir tráfico. La figura 27 muestra el proceso de revocación de membresía en el protocolo DVMRP, la terminal que se libera envía un mensaje IGMP de liberación y si el enrutador asociado no tiene a más miembros, envía el mensaje *prune* para podarse del árbol de distribución.

Cuando todos los miembros del grupo en la parte inalámbrica han revocado su membresía, es necesario que el Enrutador de Frontera envíe también un mensaje *prune* hacia el

enrutador que le entrega tráfico de multi-difusión para indicarle que se está podando del árbol. Para lograr que el Enrutador de Frontera se podes del árbol se realiza lo siguiente: cada nodo en la parte inalámbrica que se desea salir del grupo de multi-difusión envía un mensaje MACT-P, y cada nodo miembro que lo recibe retira de sus tablas de enrutamiento ese enlace descendente, y así sucesivamente. Cuando el último nodo envía el mensaje MACT-P ya no existe más el árbol de multi-difusión. Así pues, cuando el Enrutador de Frontera recibe el mensaje MACT-P, se da cuenta de que no existen más miembros interesados en tráfico de multi-difusión, entonces envía el mensaje *prune* para podarse del árbol de difusión DVMRP. La figura 28 muestra el proceso de revocación de membresía del último nodo en la red inalámbrica ad hoc y la figura 29 muestra el proceso de poda del Enrutador de Frontera del árbol de distribución en la red cableada.

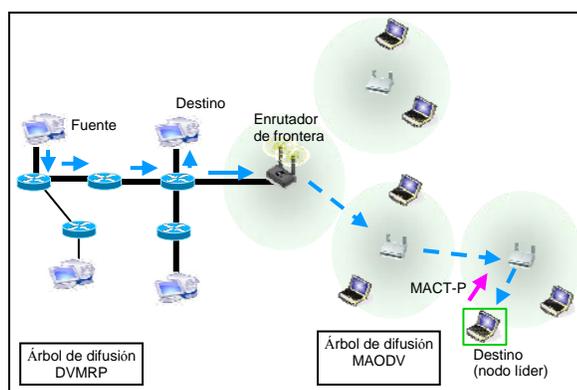


Figura 28. Nodo líder envía mensaje MACT-P y revoca su membresía.

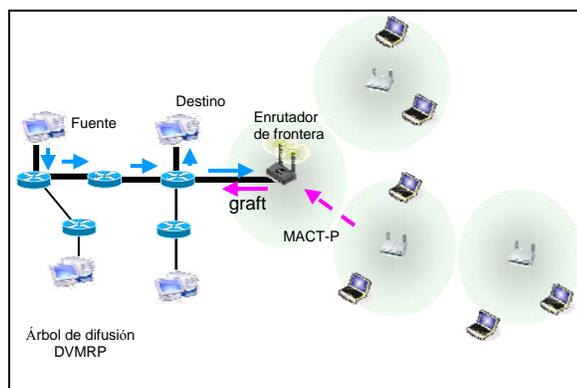


Figura 29. Proceso de revocación de membresía del Enrutador de Frontera.

V.5 Resumen

En este capítulo se describió al proceso de integración del mecanismo de multi-difusión DVMRP para redes cableadas con el mecanismo de multi-difusión MAODV para redes inalámbricas ad hoc. Se habló de la definición del Enrutador de Frontera, de la importante función que desempeña, así como de las modificaciones realizadas en este dispositivo para lograr la interoperabilidad entre los mecanismos de multi-difusión utilizados en este trabajo. Se describió el principio de operación del mecanismo de interoperabilidad, así como el proceso de unión de los nodos a un grupo de multi-difusión y del proceso de revocación de membresías.

Capítulo VI

SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

VI.1 Introducción

Para evaluar el desempeño del mecanismo de interoperabilidad se implementa la arquitectura considerada en este proyecto en el simulador de redes *Network Simulator 2* (NS-2) [McCanne y Floyd, 1995] versión 2.26.

VI.2 Simulador de Redes NS-2.26

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 multi-difusión, entre otros. NS-2 fue implementado en C++, y utiliza un intérprete OTcl para la

ejecución de escenarios de simulación. El simulador es capaz de manejar a 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 evento⁶ cuenta con un identificador único, estos eventos forman una lista ordenada cronológicamente. El planificador de tareas 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, esto no consume tiempo simulado. 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 temporizadores (*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 tareas, configurar la topología de la red utilizando las bibliotecas de componentes y configuración, indicar a las fuentes de tráfico cuándo iniciar y detener la transmisión de paquetes.

⁶ Un evento es cualquier comando ns/tcl válido.

VI.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.

VI.3.1 Modelo de Espacio libre (Free Space)

El modelo de propagación de espacio libre supone condiciones de propagación ideales donde sólo existe una trayectoria de visibilidad entre el transmisor y el receptor. En el modelo espacio libre se utiliza la ecuación de Friss, que nos ayuda a calcular la potencia en el espacio libre a una cierta distancia del transmisor [Fall y Varadhan, 2007]. En el apéndice A.1 se presentan mayores detalles del modelo de propagación de espacio libre utilizados en NS-2.

VI.3.2 Modelo de Reflexión en Tierra a Dos Rayos (Two-Ray Ground Reflection)

Puesto que el trayecto de visibilidad entre dos nodos móviles es no 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 apéndice A.2 se presentan mayores detalles sobre este modelo de propagación.

VI.3.3 Modelo de Sombreado (Shadowing)

El modelo de espacio libre y el modelo de dos rayos predicen la potencia recibida como una función determinística de la distancia. Estos modelos presentan al 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 multitrajectory, los cuales son conocidos

también como efectos de desvanecimiento. Los modelos anteriores predicen la potencia media recibida a una cierta distancia. Un modelo más general y amplio es llamado de sombreado (*Shadowing*). El modelo de sombreado consiste de dos partes. La primera es conocida como modelo de pérdida de trayecto y 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 el apéndice A.3.

VI.4 Extensiones de funcionamiento de NS-2.26

La versión original del NS-2.26 no cuenta con la instalación previa de ningún protocolo de multi-difusión para redes ad hoc y sólo cuenta con 3 protocolos de multi-difusión para redes cableadas, entonces se instaló una extensión del NS para la versión 2.26 del MAODV [Zhu y Kunz, 2004]. Partiendo de esta extensión se hicieron modificaciones para poder trabajar conjuntamente con la red cableada, también analizando otros trabajos como el de Ali Hamidian [2003] que integra el AODV⁷ con la red cableada.

Lo primero que se realizó fue la instalación del protocolo MAODV en la versión original del NS-2. El NS-2.26 ya tiene instalado el protocolo DVMRP, posteriormente se generaron escenarios con nodos cableados y con nodos inalámbricos, para instalar los dos protocolos primero de manera separada.

⁷ Ad Hoc On Demand Distance Vector

Las primeras modificaciones que se hicieron fueron las de cambiar algunos de los parámetros del protocolo MAODV. Por ejemplo, el parámetro RREP_WAIT_TIME que se utiliza para indicar el tiempo que el nodo debe esperar por la respuesta de ruta RREP después de enviar un mensaje de petición RREQ; este parámetro se modificó debido a que no se tiene pensado crear escenarios con muchos saltos y no es necesario esperar tanto tiempo por la respuesta de ruta, por ello se cambió el valor de 0.5 a 0.25 segundos. Otro parámetro que se cambió fue el de RREQ_RETRIES, que se utiliza para indicarle al nodo cuantos intentos hará para obtener una respuesta de ruta; este parámetro se modificó con el fin de que solo se realicen dos reintentos de petición de ruta, pues en la arquitectura propuesta no es necesario realizar más intentos. También se eliminó el mensaje HELLO, del protocolo AODV, como se tiene pensado solo manejar tráfico de multi-difusión en la red, basta con los mensajes GRPH para avisar el estado de la red.

La arquitectura de red que se propone requiere de nodos con 2 interfaces: una cableada y una inalámbrica. El nodo con 2 interfaces se configura para que maneje multi-difusión con el protocolo DVMRP y también con el protocolo MAODV. Como tiene que manejar el mensaje *prune* y el mensaje *graft* además de los mensajes de control de MAODV, existe conflicto porque los mensajes de control de DVMRP no están registrados en el protocolo MAODV, por lo tanto, fue necesario modificar el archivo *aodv.cc* para registrar los mensajes de control de DVMP en las rutinas de MAODV.

Para lograr que el Enrutador de Frontera enviara el mensaje *graft* y se uniera al árbol de distribución de manera automática cuando exista un grupo de multi-difusión en la red ad

hoc, se tuvo que modificar el archivo *aodv_mcast.cc* en la función *AODV::recvMGRP*.

La figura 30 muestra lo que se evalúa en dicha función.

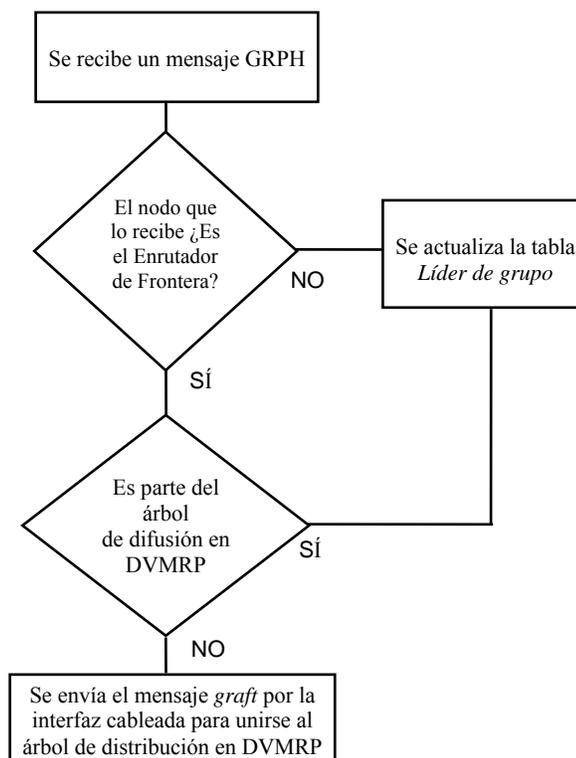


Figura 30. Proceso de unión del Enrutador de Frontera.

La figura 31 muestra la estructura interna de un nodo de multi-difusión. El tráfico entra y pasa por el agente llamado *switch_*, quien determina si los paquetes que se reciben son o no tráfico de multi-difusión. Cuando el tráfico entra al clasificador de multi-difusión, éste es direccionado a los replicadores de tráfico de multi-difusión y de los replicadores, el tráfico se envía a un agente que puede ser una aplicación en el nodo receptor. En este caso, el

tráfico se debe enviar al agente de enrutamiento AODV⁸, por lo que se requiere establecer una conexión entre el replicador de tráfico de multi-difusión y el agente de AODV.

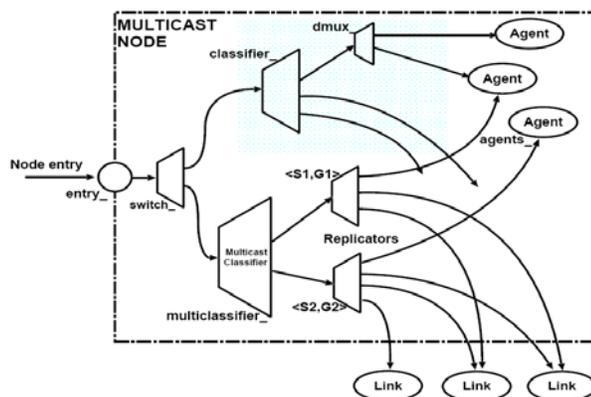


Figura 31. Estructura interna de un nodo de multi-difusión.

Una vez establecida la conexión entre el replicador de tráfico de multi-difusión y el agente de AODV, es necesario hacer una nueva modificación; los paquetes que se dirigen del replicador de tráfico de multi-difusión al agente de AODV, tienen en el encabezado como dirección de la fuente la dirección del nodo que generó el tráfico en la red cableada, este nodo no es identificado por el agente de AODV, por tal motivo, es necesario cambiar la dirección del nodo fuente por la dirección del Enrutador de Frontera, de tal manera que el Enrutador de Frontera se convierte en la virtual fuente de tráfico de multi-difusión para la red ad hoc. Estas modificaciones son realizadas en la función *AODV::recv* en el archivo *aodv.cc*.

⁸ Protocolo de enrutamiento sobre el cual trabaja MAODV

Para lograr que el enrutador de frontera se pade del árbol de difusión DVMRP, solo fue necesario modificar la función *AODV::recvMACT*, en el procedimiento *recvMACT-P*, que es donde se le indica que si el enrutador de frontera recibe al mensaje MACT-P, cambie su estado de miembro de grupo a no miembro de grupo y envíe el mensaje *prune* para liberarse del árbol de distribución de DVMRP.

VI.5 Métricas para evaluar el desempeño del mecanismo propuesto.

Existen diferentes métricas que nos ayudan a evaluar el desempeño de los mecanismos implementados en una red. Las métricas más comunes, son las que se toman para evaluar la calidad de servicio, estas métricas son: pérdida de paquetes, retardo, variación del retardo y caudal eficaz. Para evaluar el desempeño de nuestro mecanismo, tomaremos en cuenta las siguientes métricas que pueden entregarnos una mayor cantidad de información relacionada con la operación del mecanismo que se ha propuesto, considerando diferentes escenarios. Estas métricas son: tasa de entrega de datos (PDR), retado promedio extremo a extremo, sobrecarga de enrutamiento y sobrecarga; a continuación se presenta la definición detallada de cada una de estas métricas de desempeño.

VI.5.1 Tasa de Entrega de Paquetes (PDR)

Es la relación entre el número de paquetes totales de datos que los nodos miembros del grupo reciben y el total de paquetes de datos enviados por la fuente de tráfico. Los paquetes de datos pueden perderse por colisiones, por ruptura de enlaces o por desbordamiento de

registros de almacenamiento (i.e. buffer) [Aquino Santos et al., 2007; Zhu et al., 2004]. La PDR se calcula para el tráfico de multi-difusión mediante la siguiente expresión:

$$PDR = \frac{TPR}{(TPE) \cdot (NNR)} \quad (1)$$

donde TPR es el Total de Paquetes Recibidos por todos los miembros de un grupo de multi-difusión, TPE es el Total de Paquetes Enviados por la fuente del tráfico de multi-difusión y NNR es el Número de Nodos Receptores que forman parte de un mismo grupo de multi-difusión.

VI.5.2 Retardo promedio extremo a extremo

Es el promedio del retardo en la transferencia de datos que existe entre el nodo fuente y los nodos destino, este retardo puede ser causado por el encolamiento, retardos en la retransmisión en la capa MAC y por efectos de propagación. Este retardo es extremo a extremo, es decir considera todo tipo de tiempos de espera.

VI.5.3 Sobrecarga de enrutamiento

Es el número total de paquetes de enrutamiento y de control transmitidos durante todo el tiempo de simulación. Para los paquetes que cruzan por varios saltos, cada paquete retransmitido en cada salto se cuenta como otro paquete más.

VI.5.4 Sobrecarga

La sobrecarga es una medida que nos dice qué tanto porcentaje de los paquetes que circulan en la red son mensajes de control, es decir cuánto porcentaje de tráfico de la red corresponde a carga adicional y no sólo a paquetes de información. La sobrecarga es el número total de paquetes correspondientes a mensajes de control dividido por la suma total de los paquetes generados en la red (mensajes de información + mensajes de control). La sobrecarga se obtiene con la siguiente expresión:

$$\text{Sobrecarga} = \frac{TMC}{(TMC + TDT)} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

Donde *TMC* es el número Total de Mensajes de Control y *TDT* es el número Total de Datos Transmitidos.

VI.6 Escenarios, consideraciones de simulación y resultados

Para evaluar el desempeño del mecanismo propuesto, se definieron diferentes escenarios de simulación; para tal efecto, se modificaron parámetros de evaluación como: el tamaño de la red, movilidad en la red y el tamaño del grupo de multi-difusión. Además también se evaluó el mecanismo propuesto utilizando dinámica en el grupo de multi-difusión, es decir, durante el tiempo de simulación los nodos cambian el estado de sus membresías, de manera que el grupo de multi-difusión no está conformado por los mismos nodos que se eligen al inicio de la simulación, sino que cambian, permaneciendo un porcentaje máximo de nodos activos en el grupo.

VI.6.1 Consideraciones de simulación

Las simulaciones se realizaron utilizando el estándar IEEE 802.11 que viene implementado por defecto en el simulador NS-2.26. Se sabe que este protocolo maneja tecnología y tasas de transmisión obsoletas, pero los parches de actualización para NS de 802.11 b o g, que son más actuales, están disponibles para versiones más actuales de NS y no para la versión que se utilizó. En relación al modelo de propagación de radio, en este trabajo se utilizó el modelo de dos rayos.

Para observar cómo afectan los parámetros al desempeño del mecanismo propuesto se simuló bajo las siguientes consideraciones:

- Para evaluar el parámetro de tamaño de red, se varía la densidad de nodos en la red. Se crean 4 escenarios: escenario 1 con alta densidad de nodos, escenario 2 con mediana densidad de nodos, escenario 3 con baja densidad de nodos y el escenario 4 con muy baja densidad de nodos.
- Para evaluar el parámetro de movilidad de la red, se varía la velocidad máxima de los nodos, se evalúa para velocidades de 0 m/s, 1 m/s, 2 m/s y 3 m/s. Esto se hace para cada escenario de simulación.
- Para evaluar el parámetro tamaño de grupo de multi-difusión, en cada escenario y para cada velocidad máxima de nodo, se varía el porcentaje de nodos de la red que serán miembros del grupo de multi-difusión.
- Para evaluar el parámetro de dinámica del grupo de multi-difusión, se varía el estado de las membresías dentro de una misma simulación, esto se hace para

distintos porcentajes de nodos miembro, en cada uno de los 4 escenarios, tomando una velocidad máxima de nodo de 1 m/s.

VI.6.2 Escenario 1

Con el escenario 1 se pretende evaluar el desempeño del mecanismo propuesto cuando se tiene una alta densidad de nodos. El escenario 1 está compuesto por 6 nodos cableados, un nodo con interfaz cableada y con interfaz inalámbrica, 10 nodos inalámbricos fijos y 40 nodos inalámbricos móviles. De los nodos cableados tres son terminales (host) y los otros tres nodos son enrutadores de multi-difusión, una de las terminales es el servidor de tráfico de multi-difusión, las otras dos son receptoras de tráfico. El nodo con dos interfaces, es nuestro enrutador de puerta de enlace (gateway) al que se le nombró como Enrutador de Frontera. Los 10 nodos inalámbricos fijos corresponden a 10 enrutadores inalámbricos, los 40 nodos móviles inalámbricos son las terminales de usuario que potencialmente pueden unirse a un grupo de multi-difusión.

La figura 32 muestra el escenario 1 visto con el visualizador del simulador NAM (Network Animator). En la figura 33 se muestra el escenario 1 de manera esquemática para mejor comprensión de lo que se ve en el visualizador del simulador NAM.

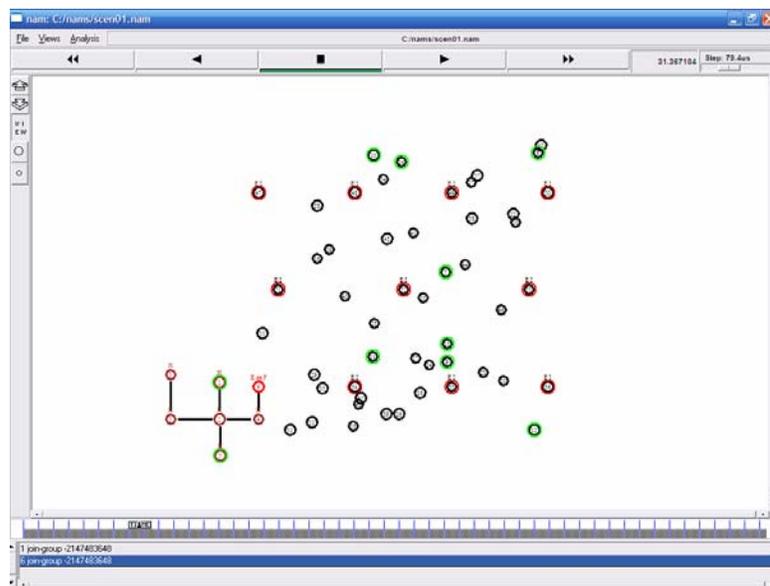


Figura 32. Visualización del escenario 1 con el NAM.

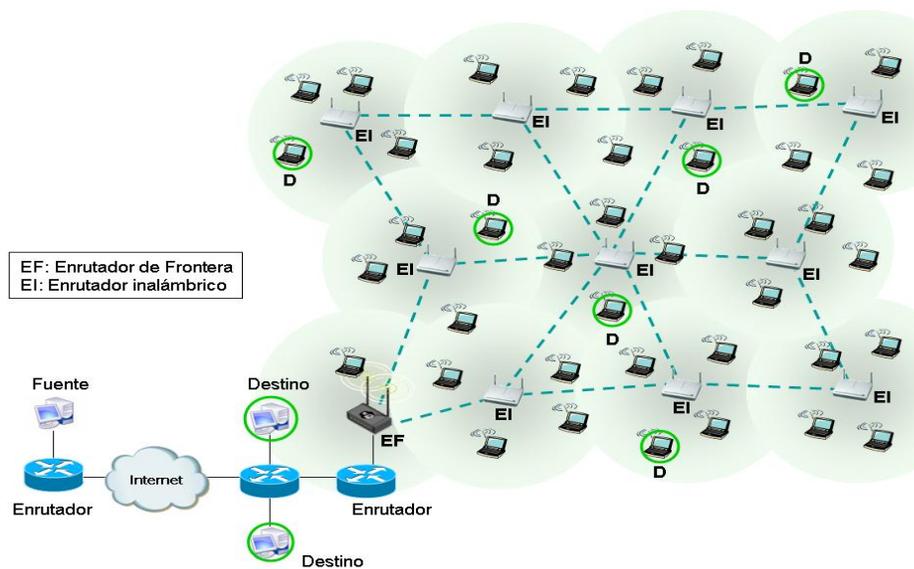


Figura 33. Escenario de simulación con 40 nodos móviles.

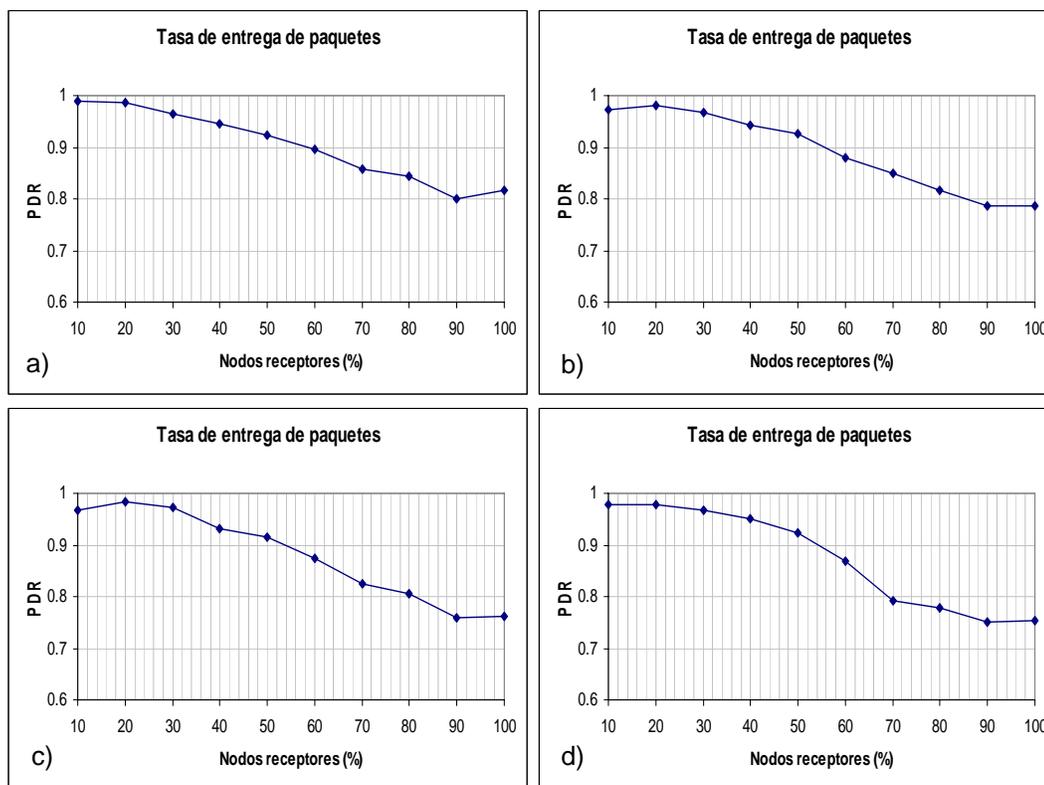
Las simulaciones para este primer escenario fueron realizadas bajo las siguientes consideraciones:

Tabla I. Parámetros de simulación para el Escenario 1.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Protocolo de Transporte	UDP	Tasa de Transmisión	100 kbps
Tipo de tráfico	CBR	Rango de Tx nodos fijos	150 m
Tamaño de Paquete	512 Bytes	Rango de Tx nodos móviles	40 m
Control de acceso al medio	CSMA/CA	Modo de transmisión	DSSS
Modelo de canal radio	Dos Rayos	Tiempo de simulación	200 s
Tasa máx. de Transmisión	2 Mbps	Tamaño de la Topología	400 x 400 m

Las simulaciones se hicieron variando el porcentaje de nodos móviles en la red que serán parte del grupo de multi-difusión desde 10% hasta el 100% de ellos, con un paso de 10% y variando la velocidad máxima con la que se mueven. Se simuló con velocidades de 0 m/s, 1 m/s, 2 m/s y 3 m/s.

VI.6.2.1 Tasa de entrega de paquetes (PDR)

**Figura 34.** Gráficas de la PDR, velocidad de nodo: a) 0 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s y d) 3 m/s.

En las gráficas mostradas en la figura 34 se puede observar como va disminuyendo la tasa de entrega de paquetes conforme el porcentaje de nodos miembros del grupo de multi-difusión aumenta, también se observa que al incrementar la velocidad de nodo, tiene como consecuencia una disminución el valor de la PDR.

VI.6.2.2 Retardo Promedio extremo a extremo

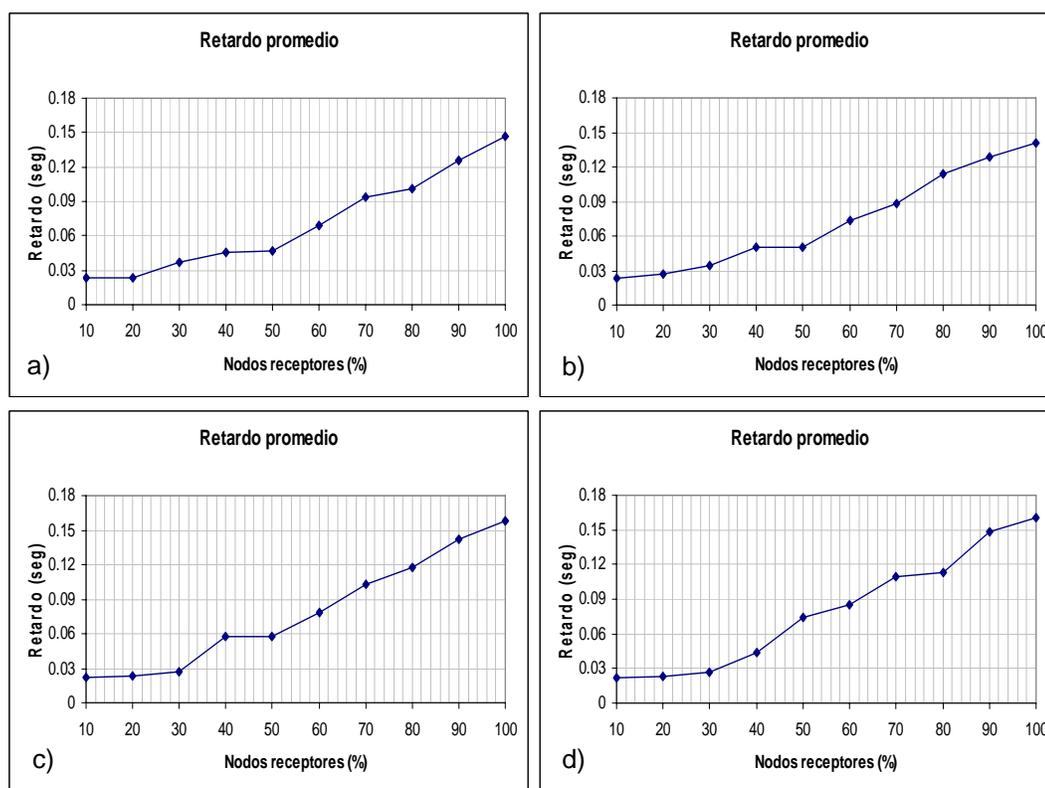


Figura 35. Gráficas del retardo promedio, velocidad de nodo: a) 0 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s y d) 3 m/s.

En las gráficas que presenta la figura 35 se puede observar como se incrementa el retardo extremo a extremo conforme se incrementa el número de nodos receptores, al igual que al aumentar la velocidad del nodo móvil.

VI.6.2.3 Sobrecarga de enrutamiento

En la tabla II se encuentran los valores correspondientes al total de mensajes de control transmitidos durante las simulaciones del escenario 1.

Tabla II. Sobrecarga de enrutamiento.

Nodos receptores en la red	Total de mensajes de control transmitidos			
	0 m/s	1 m/s	2 m/s	3 m/s
10 %	1086	1110.2	1191.4	1175.1
20 %	2000.8	2017.4	2067.9	2046.1
30 %	4549.5	4257.1	3592.3	3070.7
40 %	5151.4	5792.2	6676.4	4886.6
50 %	6374.2	6101.5	7364.9	7421.3
60 %	6327.7	5815.3	7235.5	7185.2
70 %	7607.7	6607.3	7758.6	7851.8
80 %	6731.5	7125	6827.7	7037.9
90 %	6956.7	7439.4	7503.4	7395.4
100 %	6915.8	7261.2	7051.5	6879.6

En la tabla II se observa cómo se incrementan los mensajes de control cuando existe mayor movilidad en la red, aunque no es tan significativa la diferencia, sí se ve reflejado el efecto del cambio de rutas cuando hay mayor movilidad. La figura 36 muestra una gráfica con los resultados de la tabla II.

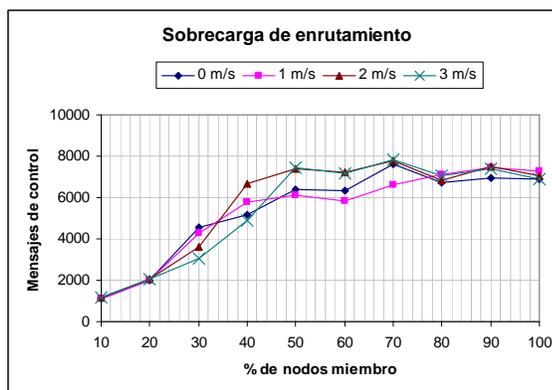


Figura 36. Gráfica de la sobrecarga de enrutamiento.

VI.6.2.4 Sobrecarga

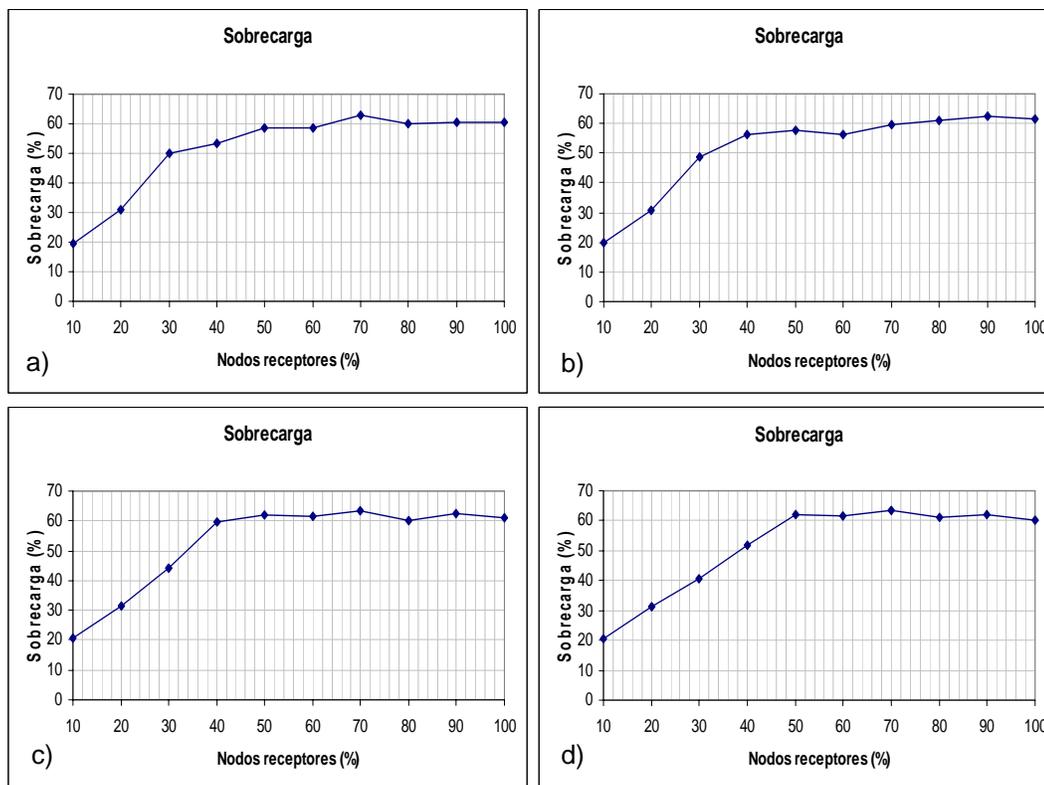


Figura 37. Gráfica de la sobrecarga en la red, velocidad de nodo: a) 0 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s y c) 3 m/s.

En las gráficas que se presentan en la figura 37 se observa que en todos los casos la sobrecarga supera el 50%, esto significa que hay mayor cantidad de mensajes de control que de paquetes de información y aunque el tamaño de paquete de mensajes de control es de 48 bytes y algunos de ellos 100 bytes, comparados con el tamaño de paquete de información que es de 512 bytes, el hecho de que la sobrecarga llegue a valores de más de 60%, quiere decir que se generan casi el doble de mensajes de control que paquetes de información.

VI.6.2.5 Comparación

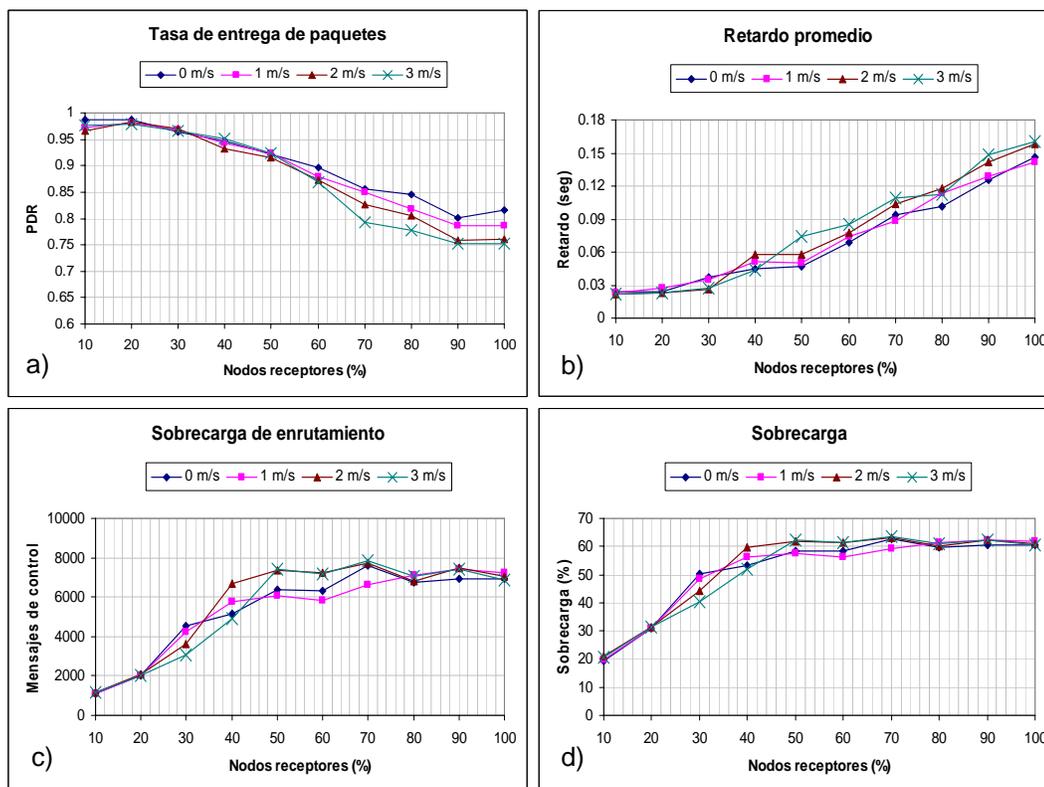


Figura 38. Comparación entre las métricas obtenidas del escenario 1.

Como puede observarse en la figura 36, el desempeño del mecanismo se ve más afectado por el parámetro de tamaño de grupo de multi-difusión, que por el de movilidad en la red. El análisis hecho para este escenario con alta densidad de nodos en la red, indica que el mecanismo no tiene un buen desempeño cuando el tamaño del grupo de multi-difusión crece. Cuando más del 50% de nodos móviles son miembros del grupo, se genera alta sobrecarga y como consecuencia existe una mayor pérdida de paquetes, provocadas por colisiones y por desbordamiento de los registros de almacenamiento, también tiene como consecuencia un mayor incremento en el retardo promedio.

VI.6.3 Escenario 2

Con el escenario 2 se pretende evaluar el desempeño del mecanismo propuesto cuando se tiene una mediana densidad de nodos en la red. El escenario 2 es muy similar al escenario 1, lo único que varía es la cantidad de nodos móviles, que en este caso se reduce a 30. La idea de variar la cantidad de nodos es para evaluar el impacto del parámetro de tamaño de la red en relación con el desempeño del mecanismo de multi-difusión. La figura 39 muestra una imagen representativa del escenario 2.

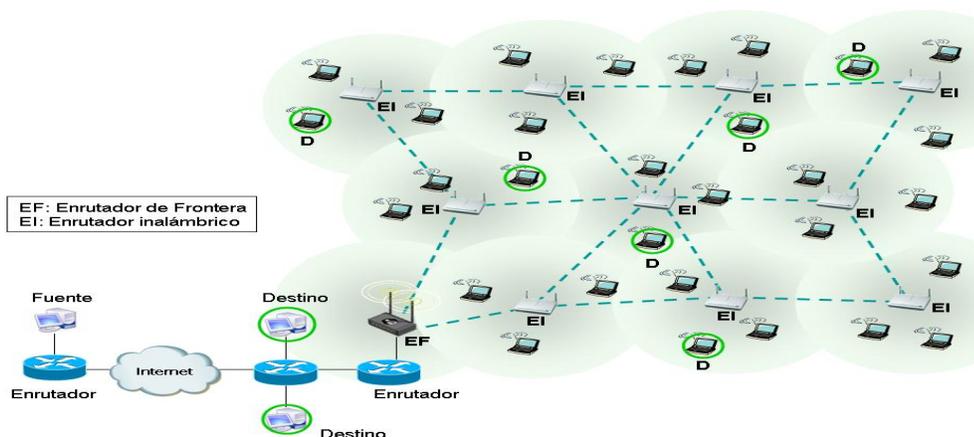


Figura 39. Escenario de simulación con 30 nodos móviles.

Las simulaciones para escenario 2 fueron realizadas bajo las siguientes consideraciones:

Tabla III. Parámetros de simulación para el Escenario 2.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Protocolo de Transporte	UDP	Tiempo de simulación	200 seg.
Tipo de tráfico	CBR	Modo de transmisión	DSSS
Tamaño de Paquete	512 bytes	Tiempo de simulación	200 seg.
Control de acceso al medio	CSMA/CA	Tamaño de la Topología	400 x 400 m
Modelo de canal radio	Dos Rayos	Nodos móviles	30
Tasa máx. de Transmisión	2 Mbps	Enrutadores Inalámbricos	10
Tasa de Transmisión	100 kbps	Enrutadores cableados	3
Rango de Tx nodos fijos	150 m	Terminales cableadas	3
Rango de Tx nodos móviles	40 m	Enrutadores de Frontera	1

Para obtener las métricas, se realiza la misma secuencia de eventos que en el escenario 1.

VI.6.3.1 Tasa de entrega de paquetes (PDR)

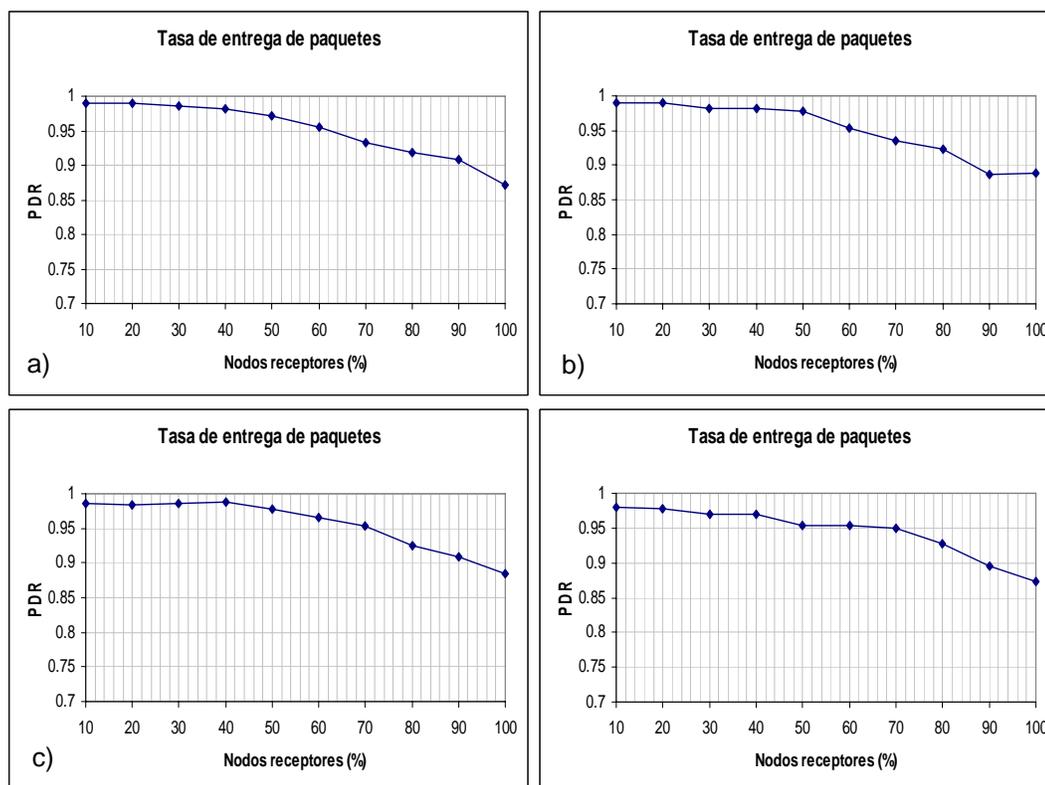


Figura 40. Gráficas de la PDR, velocidad de nodo: a) 0 m/s, b) 1 m/s C) 2 m/s y d) 3 m/s.

La figura 40 muestra las gráficas correspondientes a la tasa de entrega de paquetes. En las gráficas mostradas se puede observar como va disminuyendo la tasa de entrega de paquetes conforme el porcentaje de nodos miembros del grupo de multi-difusión aumenta. También se puede observar que al incrementar la velocidad de nodo no existe mucha diferencia entre los valores de las métricas, lo que indica que el poco aumento en la velocidad del nodo no afecta en gran medida a la tasa de entrega de paquetes.

VI.6.3.2 Retardo Promedio extremo a extremo

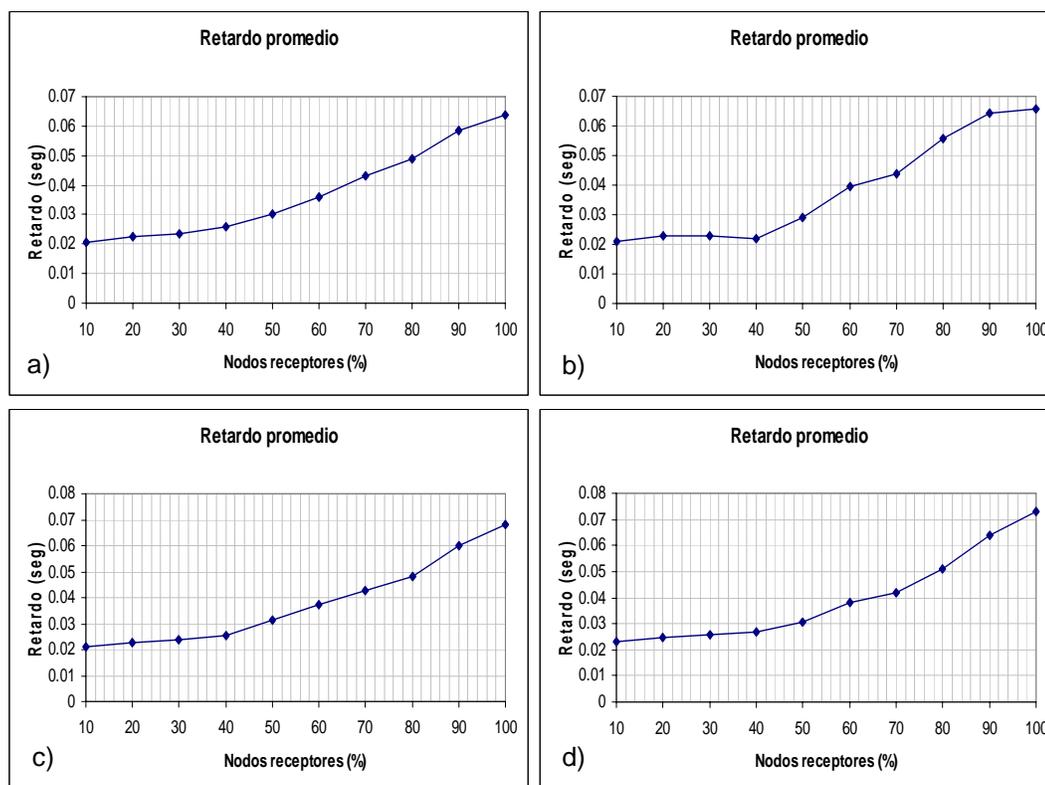


Figura 41. Gráficas del retardo promedio, velocidad de nodo: a) 0 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s y c) 3 m/s.

La figura 41 muestra las gráficas correspondientes al retardo promedio del escenario 2. En las gráficas se puede observar cómo se incrementa el retardo extremo a extremo conforme se incrementa el número de nodos receptores. Cuando se añade movilidad, se observa que existe un cambio no muy significativo en el comportamiento del retardo, lo que indica que cuando hay poca variación en la velocidad de nodo, no hay tanto cambio en el retardo.

VI.6.3.3 Sobrecarga de enrutamiento

En la tabla IV se encuentran los valores del total de mensajes de control transmitidos durante las simulaciones.

Tabla IV. Sobrecarga de enrutamiento.

Nodos receptores (%)	Total de mensajes de control transmitidos			
	0 m/s	1 m/s	2 m/s	3 m/s
10	601.854545	612.781818	644.590909	640.659091
20	1066.05455	1079.6	1111.95455	1158.61364
30	1435.58182	1393.38182	1517.13636	1499.63636
40	1848.36364	1643.65455	1772.75	1951.29545
50	2843.58182	2905.14545	2919.22727	3214.70455
60	3416.50909	3556.87273	3164.15909	3311.63636
70	3589.56364	4275.83636	3388.22727	4262.63636
80	4530.72727	4753.85455	4704.52273	4420.36364
90	5160.78182	5374.87273	4901.93182	5166.38636
100	5174	5443.90909	5129.81818	5564.81818

En la tabla IV se observa cómo se incrementan los mensajes de enrutamiento cuando existe mayor movilidad en la red, aunque no es tan significativa la diferencia entre ellos, sí se ve reflejado el efecto del cambio de rutas cuando hay mayor movilidad. La figura 42 muestra la gráfica de la sobrecarga de enrutamiento.

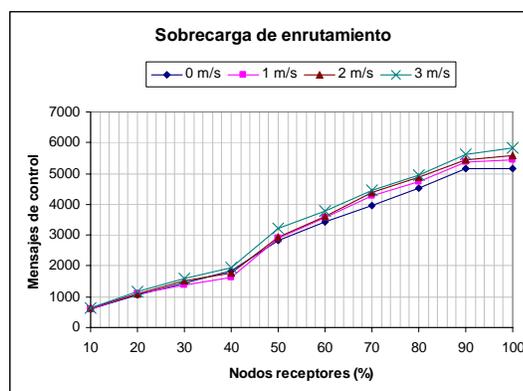


Figura 42. Gráfica de la sobrecarga de enrutamiento.

VI.6.3.4 Sobrecarga

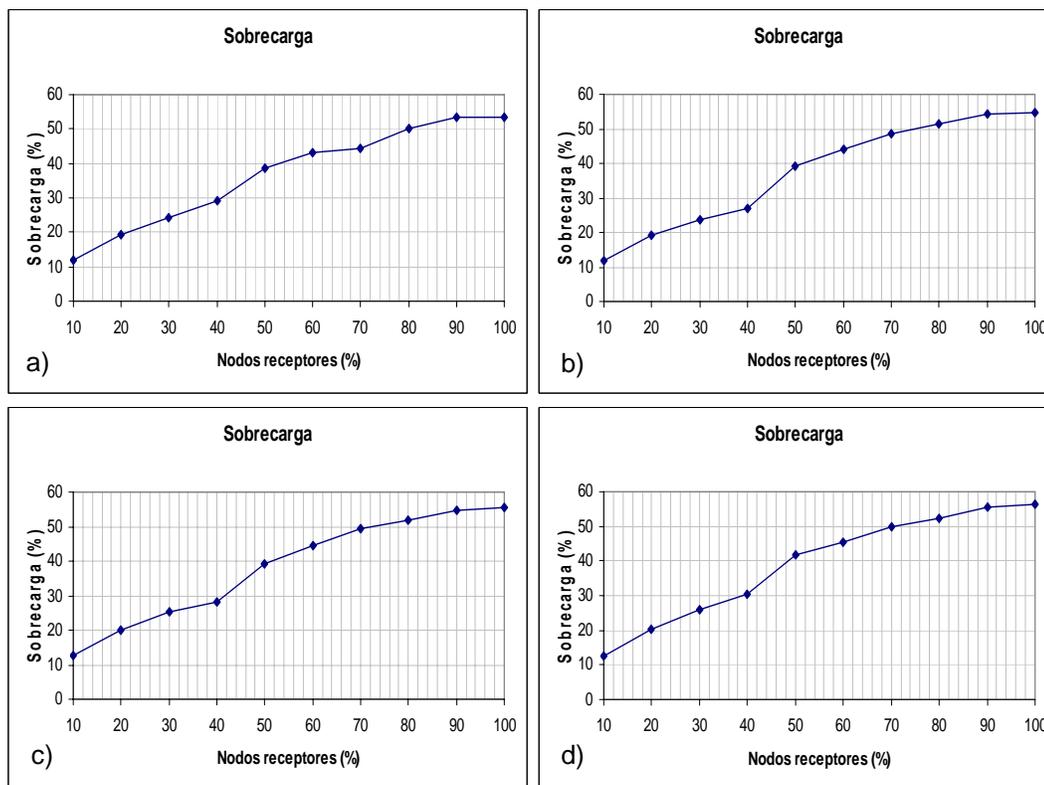


Figura 43. Gráficas de la sobrecarga en la red, velocidad de nodo: a) 0 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s y d) 3 m/s.

La figura 43 muestra los resultados obtenidos de sobrecarga en la red para velocidades de nodo de 0, 1, 2 y 3 m/s. Igual que en el escenario anterior, existe una sobrecarga mayor al 50%, nuevamente tenemos más tráfico de paquetes de mensajes de control que de paquetes de información, también se observa que el valor de la sobrecarga se redujo a menos del 60%, mientras que en el escenario anterior se obtuvieron valores superiores al 60%, lo que indica que al tener una menor densidad de nodos en la red, existe una disminución de la sobrecarga.

VI.6.3.5 Comparación

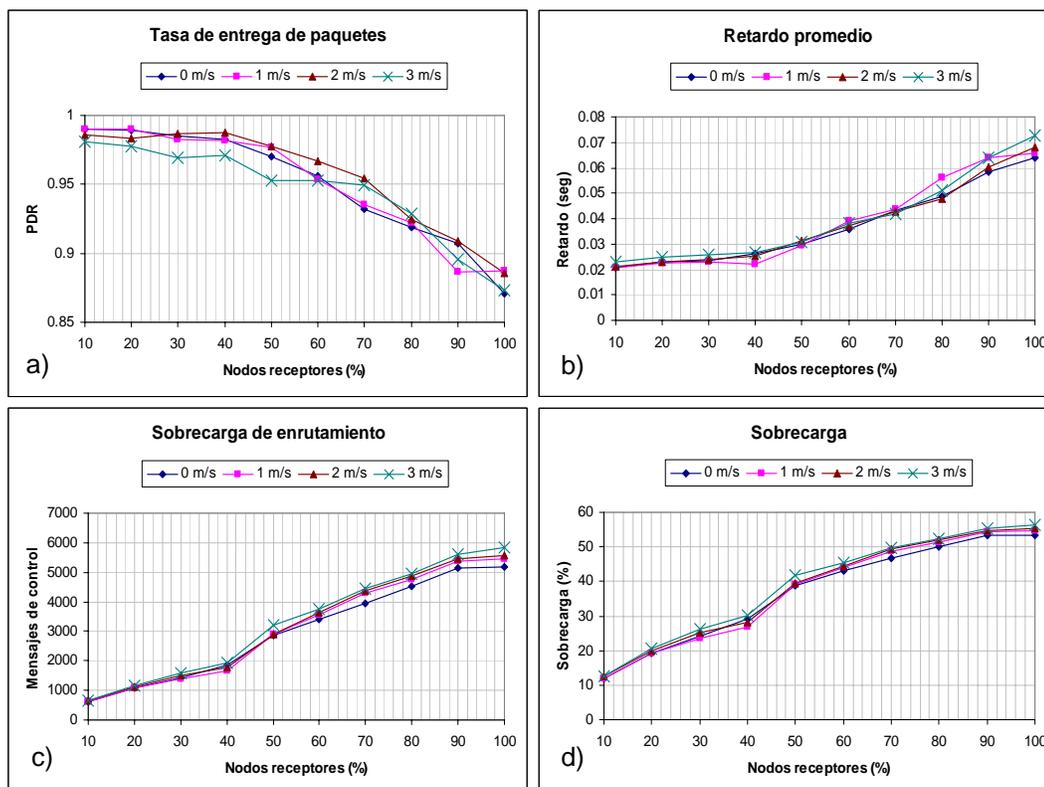


Figura 44. Comparación entre las métricas obtenidas del escenario 2.

La figura 44 muestra una comparación de los resultados de tasa de entrega de paquetes, retardo y sobrecarga obtenidos en el escenario 2 para distintas velocidades de nodo. Las gráficas obtenidas de las simulaciones muestran que las métricas se ven más afectadas por el incremento en el número de nodos miembros del grupo de multi-difusión que por el efecto de la movilidad de los nodos. Para este escenario que cuenta con media densidad de nodos, se observa que cuando el grupo de multi-difusión es muy grande, existe degradación en las prestaciones del mecanismo, esto se debe a que se genera alta sobrecarga en el proceso de mantenimiento del árbol de multi-difusión y al existir alta sobrecarga trae como consecuencia degradación en la entrega de paquetes e introduce incremento en el retardo.

VI.6.4 Escenario 3

Con el escenario 3 se pretende hacer la evaluación del impacto del mecanismo propuesto cuando se tiene una baja densidad de nodos en la red. El escenario3 es muy similar al escenario 2, pero en esta ocasión la cantidad de nodos móviles se reduce a 20. La figura 45 muestra un esquema del escenario 3.

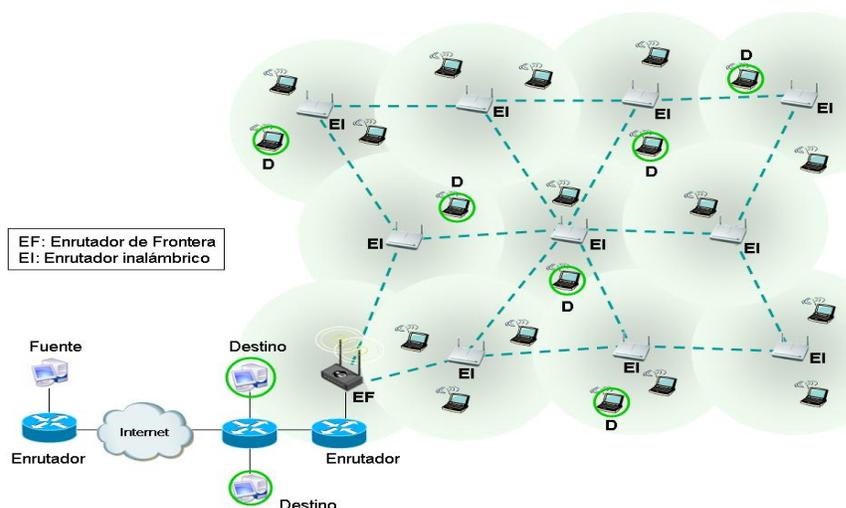


Figura 45. Escenario de simulación con 20 nodos móviles.

Las simulaciones para escenario 3 fueron realizadas bajo las siguientes consideraciones:

Tabla V. Parámetros de simulación para el Escenario 3.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Protocolo de Transporte	UDP	Modo de transmisión	DSSS
Tipo de tráfico	CBR	Tiempo de simulación	200 seg.
Tamaño de Paquete	512 bytes	Tamaño de la Topología	400 x 400 m
Control de acceso al medio	CSMA/CA	Nodos móviles	20
Modelo de canal radio	Dos Rayos	Enrutadores Inalámbricos	10
Tasa máx. de Transmisión	2 Mbps	Enrutadores cableados	3
Tasa de Transmisión	100 kbps	Terminales cableadas	3
Rango de Tx nodos fijos	150 m	Enrutadores de Frontera	1
Rango de Tx nodos moviles	40 m	Tiempo de simulación	200 seg.

Para obtener las métricas, se realiza la misma secuencia de eventos que en escenario 1 y 2.

VI.6.4.1 Tasa de entrega de paquetes (PDR)

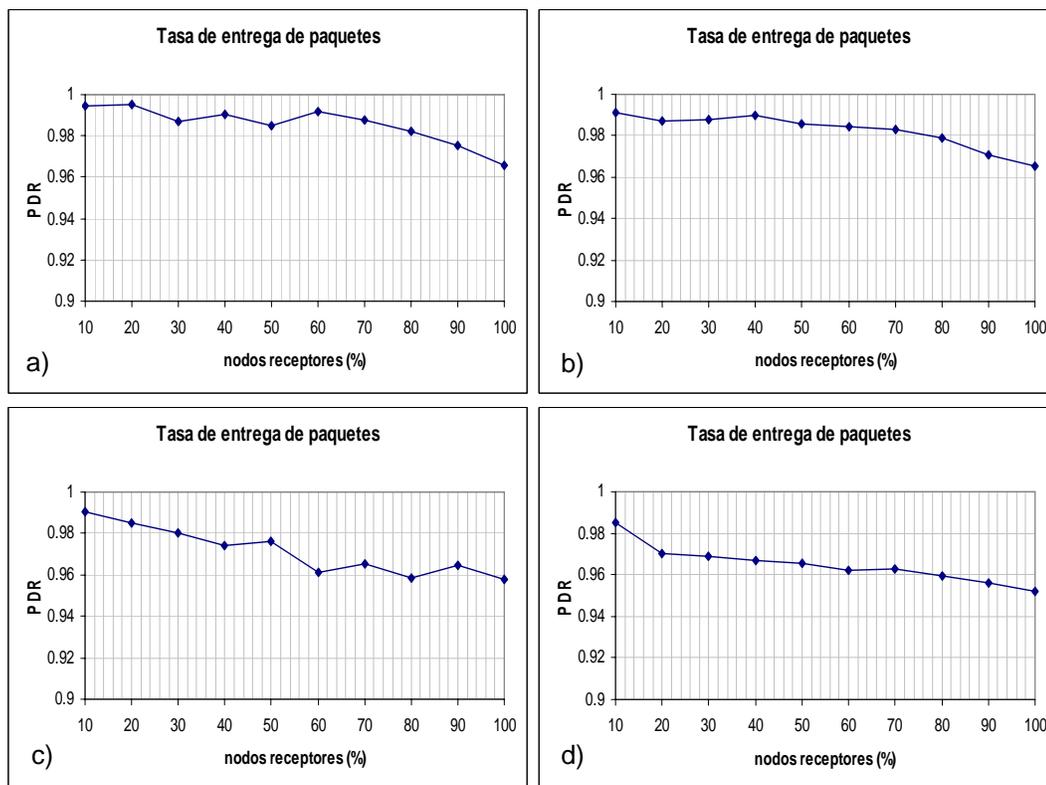


Figura 46. Gráfica de la PDR para una velocidad de nodo de: a) 0 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s y c) 3 m/s.

La figura 46 muestra los resultados de tasa de entrega de paquetes de las simulaciones realizadas con el escenario 3. En las gráficas mostradas se puede observar como va disminuyendo la tasa de entrega de paquetes conforme el porcentaje de nodos móviles de la red que son miembros del grupo de multi-difusión aumenta, también se puede observar que al agregar movilidad no hay mucha variación entre las métricas, lo que indica que el poco aumento en la velocidad del nodo no afecta en gran medida a la tasa de entrega de paquetes.

VI.6.4.2 Retardo Promedio extremo a extremo

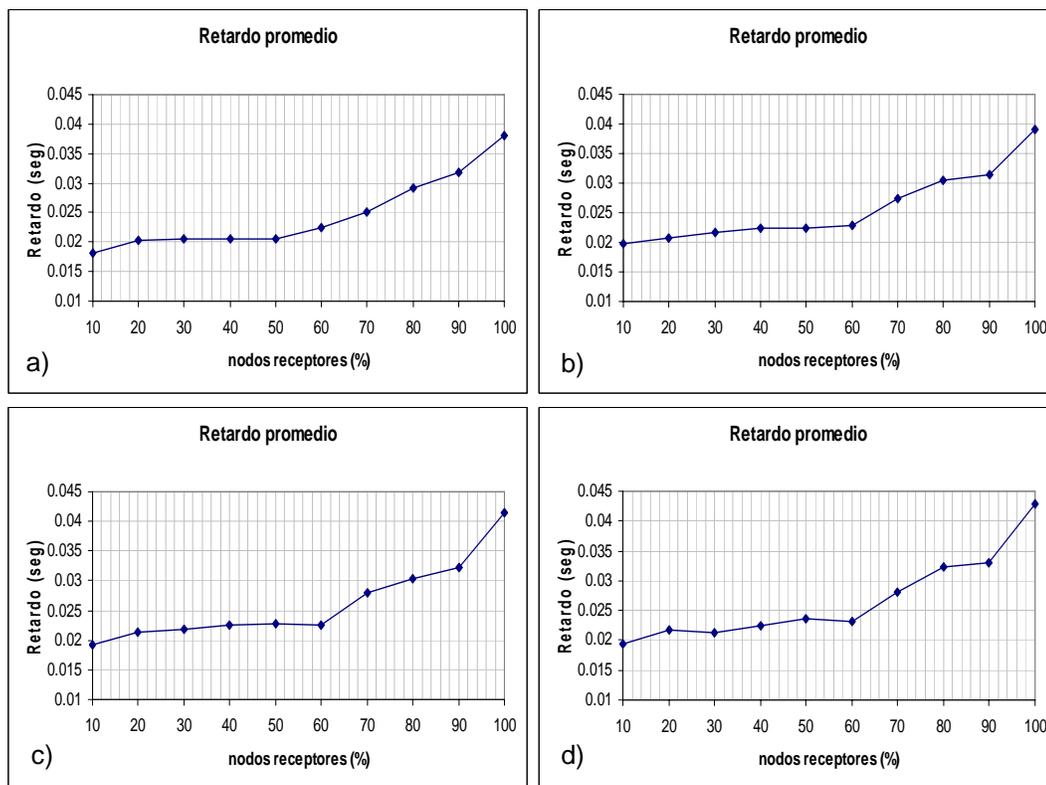


Figura 47. Gráfica del retardo promedio para velocidad de: a) 0 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s y c) 3 m/s.

En las gráficas que se presentan en la figura 47 se puede observar cómo se incrementa el retardo extremo a extremo conforme se incrementa el número de nodos receptores. Cuando se añade movilidad, se observa que existe un cambio no muy significativo en el comportamiento del retardo, lo que indica que cuando hay poca variación en la velocidad de nodo, no hay tanto cambio en el retardo.

VI.6.4.3 Sobrecarga de enrutamiento

En la tabla VI se encuentran los valores que corresponden al total de mensajes de control transmitidos durante las simulaciones.

Tabla VI. Sobrecarga de enrutamiento.

Nodos receptores (%)	Total de mensajes de control transmitidos			
	0 m/s	1 m/s	2 m/s	3 m/s
10 %	341.2	338.4	357.8	359.4
20 %	619.8	636.1	650.8	654
30 %	855.9	859.8	874.6	889.8
40 %	1031.8	1106.3	1135.1	1175.9
50 %	1166.5	1175	1194.3	1289.9
60 %	1326	1434.3	1378.2	1455.1
70 %	1547.4	1587.5	1658.7	1678.1
80 %	1750.4	1808.4	1830.2	1930.2
90 %	1801.9	1898	1983.2	2032.5
100 %	1933.1	2119.8	2186.2	2250.3

En la tabla VI se observa cómo se incrementan los mensajes de control cuando existe mayor movilidad en la red, se observa que también se ve reflejado el efecto del cambio de rutas cuando hay mayor movilidad. En la figura 48 se muestra gráficamente el comportamiento de la sobrecarga de enrutamiento.

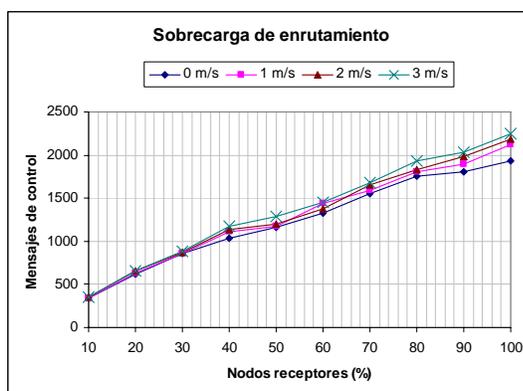


Figura 48. Gráfica comparativa de la sobrecarga de enrutamiento.

VI.6.4.4 Sobrecarga

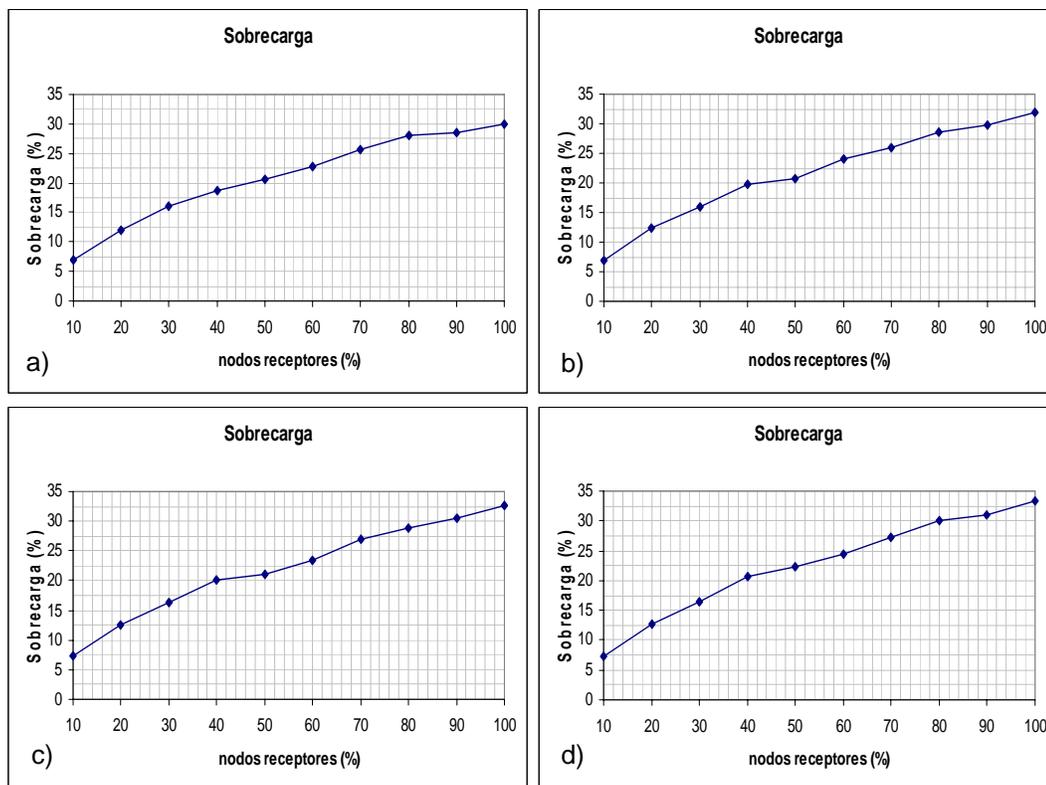


Figura 49. Gráficas de la sobrecarga, velocidad de nodo de: a) 0 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s y d) 3 m/s.

La figura 49 muestra los resultados correspondientes a la sobrecarga de la red obtenida en las simulaciones de este escenario utilizando velocidad de nodo de 0, 1, 2 y 3 m/s. En este escenario ya se observa que la sobrecarga de la red no rebasa el 50%, el valor máximo de sobrecarga ronda el 35%, lo que significa que para este escenario con baja densidad de nodos, el parámetro del tamaño de grupo de multi-difusión no afecta tan significativamente como en los dos escenarios anteriores, es normal que al haber más nodos móviles miembros del grupo se genere más tráfico de control, principalmente en el mantenimiento del árbol de distribución.

VI.6.4.5 Comparación

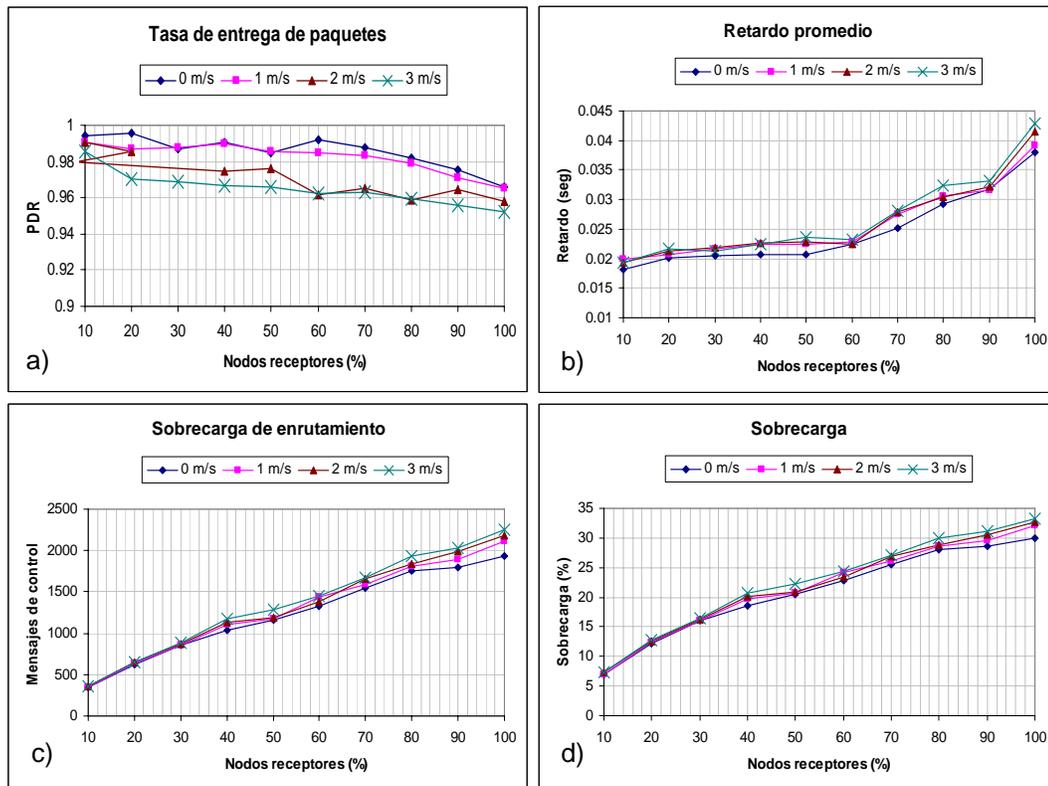


Figura 50. Comparación entre las métricas obtenidas del escenario 3.

La figura 50 muestra una comparación entre las métricas obtenidas en el escenario 3. En este escenario ya se aprecia un poco más el efecto de la velocidad de nodo en las estadísticas obtenidas, se puede observar una diferencia entre los resultados de la PDR obtenidos, sin embargo, el efecto que provoca el incremento del tamaño de grupo de multi-difusión sigue siendo más notable. Se puede observar que las gráficas de sobrecarga se mantienen muy parecidas ante el incremento de la velocidad de nodo. Cuando se tiene una baja densidad de nodos, el parámetro de movilidad en la red, no afecta de manera significativa al mecanismo propuesto.

VI.6.5 Escenario 4

Con el escenario 4 se pretende evaluar el desempeño del mecanismo propuesto cuando se tiene una muy baja densidad de nodos. El escenario 4 tiene las mismas características que los escenarios anteriores, la diferencia es que la cantidad de nodos móviles se reduce a 10 y así se evalúa el parámetro de tamaño de la red. La figura 51 muestra un esquema del escenario 4.

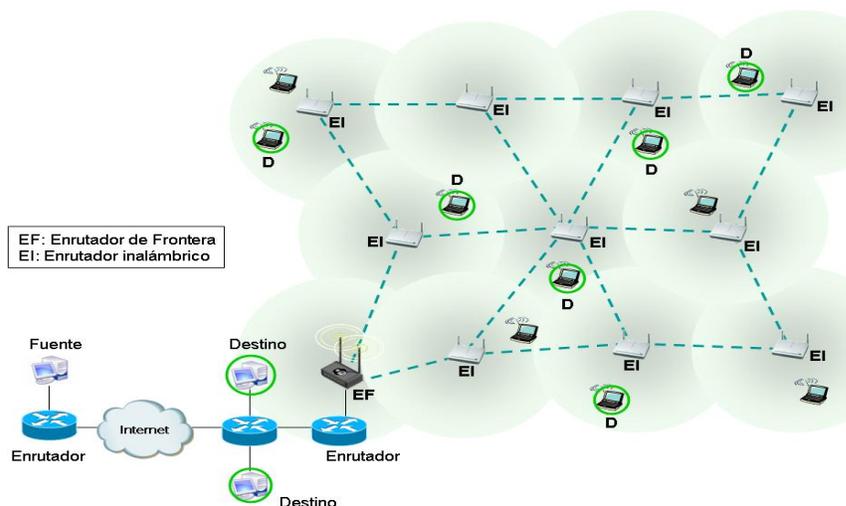


Figura 51. Escenario de simulación con 10 nodos móviles.

Las simulaciones para escenario 4 fueron realizadas bajo las siguientes consideraciones:

Tabla VII. Parámetros de simulación para el Escenario 4.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Protocolo de Transporte	UDP	Modo de transmisión	DSSS
Tipo de tráfico	CBR	Tiempo de simulación	200 seg.
Tamaño de Paquete	512 bytes	Tamaño de la Topología	400 x 400 m
Control de acceso al medio	CSMA/CA	Nodos móviles	10
Modelo de canal radio	Dos Rayos	Enrutadores Inalámbricos	10
Tasa máx. de Transmisión	2 Mbps	Enrutadores cableados	3
Tasa de Transmisión	100 Kbps	Terminales cableadas	3
Rango de Tx nodos fijos	150 m	Enrutadores de Frontera	1
Rango de Tx nodos móviles	40 m	Tiempo de simulación	200 seg.

VI.6.5.1 Tasa de entrega de paquetes (PDR)

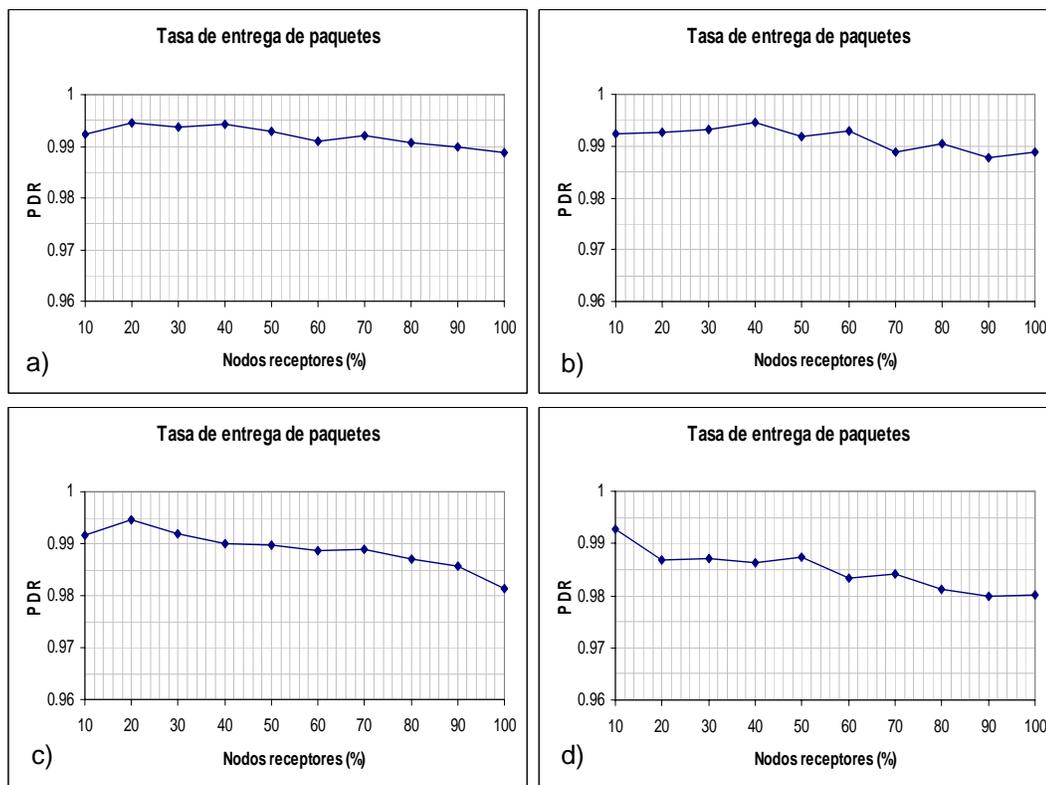


Figura 52. Gráfica de la PDR para una velocidad de nodo de: a) 0 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s y c) 3 m/s.

La figura 52 muestra los resultados de tasa de entrega de paquetes de las simulaciones realizadas con el escenario 4. En las gráficas obtenidas se puede observar cómo disminuye la tasa de entrega de paquetes conforme el porcentaje de nodos móviles de la red que son miembros del grupo de multi-difusión aumenta, también se puede observar que al añadir movilidad no se ve degradado el desempeño del mecanismo de manera significativa, lo que indica que ese aumento en la velocidad del nodo no afecta en gran medida a la tasa de entrega de paquetes.

VI.6.5.2 Retardo Promedio extremo a extremo

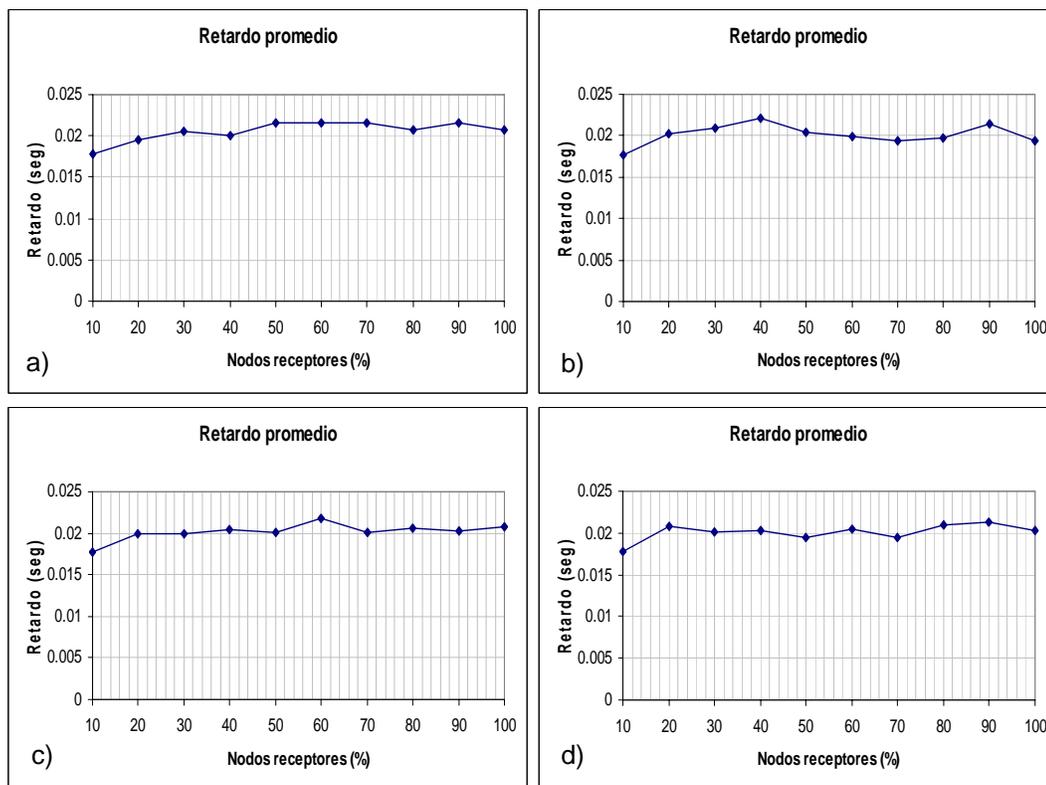


Figura 53. Gráfica del retardo promedio para velocidad de: a) 0 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s y c) 3 m/s.

La figura 53 presenta los resultados de retardo obtenidos para el escenario 4. En las gráficas se puede observar cómo el retardo extremo a extremo se mantiene en un nivel más o menos constante conforme se incrementa el número de nodos receptores. Cuando se añade movilidad, se observa que no hay un cambio muy significativo en el comportamiento del retardo, esto quiere decir que al igual que en los escenarios anteriores, el aumento en la velocidad que se consideró para estos escenarios no tiene mucho impacto en el desempeño del mecanismo propuesto.

VI.6.5.3 Sobrecarga de enrutamiento

En la tabla VII se encuentran los valores correspondientes al total de mensajes de control transmitidos durante las simulaciones del escenario 4.

Tabla VIII. Sobrecarga de enrutamiento.

Nodos receptores en la red	Total de mensajes de control transmitidos			
	0 m/s	1 m/s	2 m/s	3 m/s
10 %	137.1	137.5	145.5	145.7
20 %	232.2	233.9	249.4	252.2
30 %	324.9	327.1	335.8	332.6
40 %	412.8	419	421	437.4
50 %	493.5	503.1	496	520.3
60 %	556.4	562.1	568	573.5
70 %	602.5	610.2	617.5	631
80 %	632.6	636.2	678.9	682.7
90 %	687.9	701.9	721.7	727.4
100 %	704.1	709.9	779.2	784.8

Como en los escenarios anteriores, es poco el impacto de la velocidad de los nodos, esto porque no se está usando mucha movilidad, sin embargo, se observa que sí existe un incremento en la cantidad de mensajes de control, traduciéndose en que hubo cambios de ruta. La figura 54 muestra una gráfica comparativa de la sobrecarga de enrutamiento a distintas velocidades.

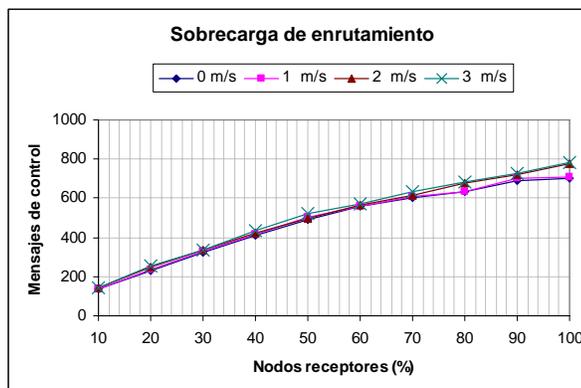


Figura 54. Gráfica de la sobrecarga de enrutamiento.

VI.6.5.4 Sobrecarga

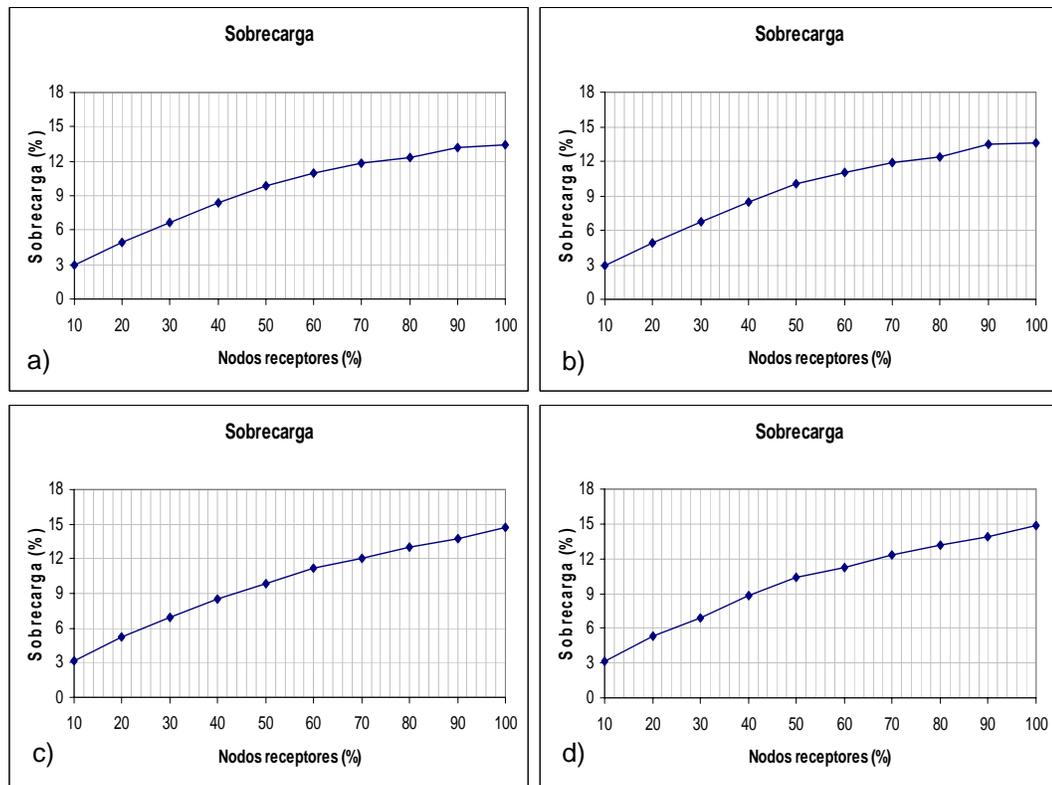


Figura 55. Gráficas de la sobrecarga, velocidad de nodo de: a) 0 m/s, b) 1 m/s, c) 2 m/s y d) 3 m/s.

La figura 55 muestra los resultados correspondientes a la sobrecarga de la red obtenida en las simulaciones de este escenario utilizando velocidad de nodo de 0, 1, 2 y 3 m/s. En este escenario se observa que la sobrecarga llega hasta el 15%. Cuando hay pocos nodos en la red, existe una menor generación de mensajes de control, aunque esto era evidente, el hecho de haber variado la cantidad de nodos en la red era necesario para ver el impacto del parámetro de tamaño de la red, en todas las métricas.

VI.6.5.5 Comparación

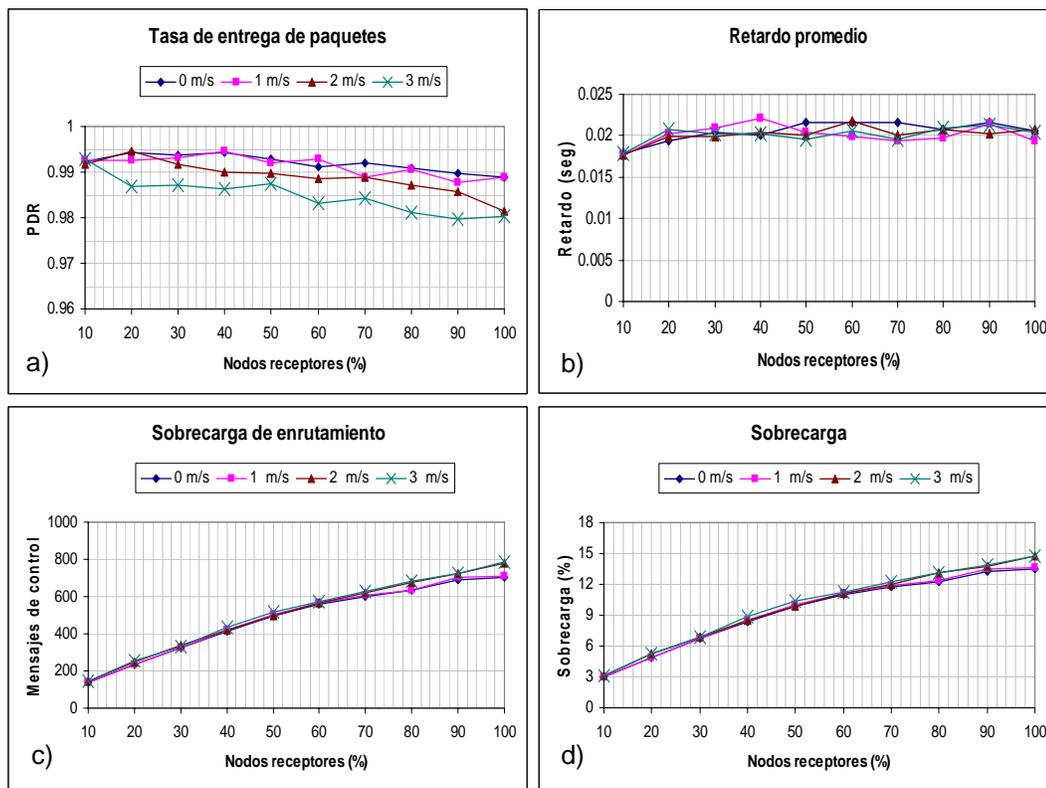


Figura 56. Comparación entre las métricas obtenidas del escenario 4.

La figura 56 muestra una comparación entre las métricas obtenidas en el escenario 4. Para este escenario se observa que las métricas se mantienen muy similares en las 4 velocidades de nodo utilizadas. En este escenario se observa, que la única métrica que se ve afectada significativamente es la de sobrecarga, y se debe a que cuando se tienen más nodos miembros de grupo de multi-difusión, existirá mayor cantidad de mensajes de control. Las métricas de retardo y de tasa de entrega de datos, se mantienen en un nivel casi constante, sin importar la cantidad de miembros ni la velocidad del nodo.

VI.7 Evaluando la dinámica del grupo de multi-difusión.

Las simulaciones realizadas para los 4 escenarios anteriores sólo toman a un grupo de multi-difusión fijo con n miembros. Para cada escenario se varía el tamaño del grupo de multi-difusión para cada simulación y no se considera que el estado de las membresías se modifique durante la simulación, es decir, los nodos que se seleccionan como miembros del grupo permanecen como miembros del grupo durante todo el tiempo de simulación.

A continuación se presentan diversos escenarios considerando un grupo de multi-difusión dinámico. En cada escenario considera un número fijo de nodos receptores, pero en este caso se varía el estado de la membresía como miembros del grupo. Durante la simulación, algunos nodos revocarán su membresía y nuevos nodos serán miembros del grupo de multi-difusión manteniendo al grupo del mismo tamaño. La finalidad de variar este parámetro, es la de observar el impacto en la sobrecarga de enrutamiento y la sobrecarga de la red, no se toma en cuenta la tasa de entrega de paquetes, pues durante la simulación habrá nodos que dejen de recibir tráfico y habrá nuevos nodos que lo reciban, entonces esto complica el determinar con certeza la cantidad de paquetes recibidos satisfactoriamente en la red.

Para realizar las simulaciones considerando dinámica en el grupo de multi-difusión, se utilizaron los 4 escenarios anteriores, para evaluar este parámetro en redes con distintas densidades de nodos. Como se observó en los resultados presentados en las secciones anteriores, la poca movilidad en el sistema no afecta en gran medida, de tal manera que en las siguientes simulaciones solo se utiliza 1 m/s como valor de velocidad máxima de nodo.

VI.7.1 Escenario 1

Se utilizan los mismos parámetros de simulación que en el escenario 1, presentado en la sección VI.6.2. Se comparan las métricas de retardo promedio, sobrecarga de enrutamiento y sobrecarga.

La unión y separación de los nodos a un grupo de multi-difusión, se realiza de manera manual por parte del usuario, para las siguientes simulaciones, se toma un tamaño de grupo de multi-difusión fijo, después de 100 segundos de simulación se revocan las membresías de la mitad de los miembros del grupo, después de 30 segundos, nuevos nodos se unen al grupo de multi-difusión para completar el porcentaje de nodos definido.

VI.7.1.1 Retardo promedio

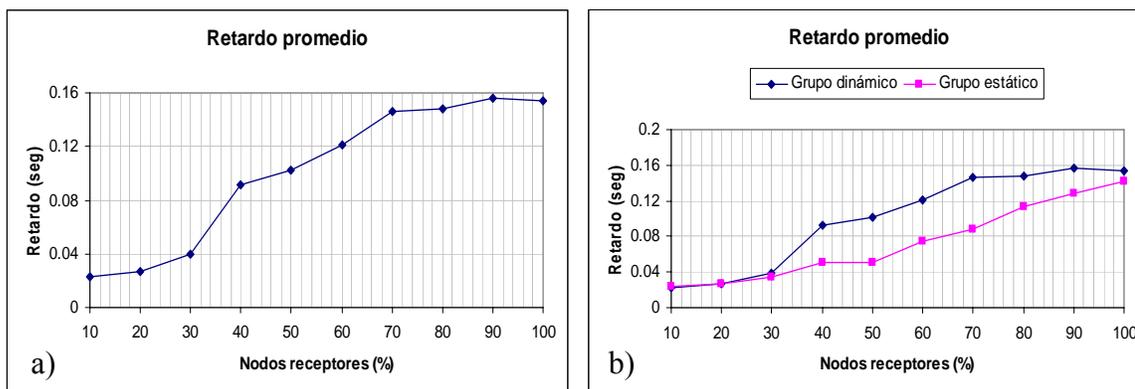


Figura 57. Retardo promedio, a) para grupo dinámico. b) Comparación contra grupo estático.

La figura 57 muestra la gráfica correspondiente al retardo promedio del escenario 1 utilizando un grupo de multi-difusión dinámico (Fig. 57 a) y una comparación entre los

resultados correspondientes al grupo estático y correspondientes al grupo dinámico (Fig. 57 b). Se observa en las gráficas que al utilizar un grupo de multi-difusión dinámico, tiene como consecuencia un aumento en el retardo promedio comparado contra el mismo escenario pero utilizando un grupo de multi-difusión estático.

VI.7.1.2 Sobrecarga de enrutamiento.

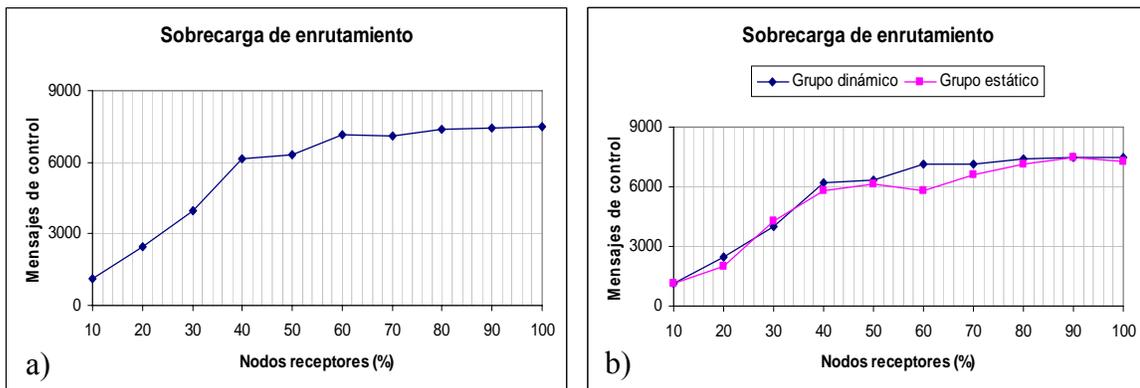


Figura 58. Sobrecarga de enrutamiento, a) para grupo dinámico. b) comparación contra un grupo estático.

En la figura 58 se muestra la gráfica correspondiente a la sobrecarga de enrutamiento para el escenario 1 cuando se tiene un grupo dinámico de receptores (Fig. 58 a) y se muestra la comparación del desempeño observado entre un grupo estático y un grupo dinámico (Fig. 58 b). Se puede observar que tienen un comportamiento similar y no hay mucha diferencia entre los resultados de sobrecarga de enrutamiento para un grupo estático y un grupo dinámico.

VI.7.1.3 Sobrecarga

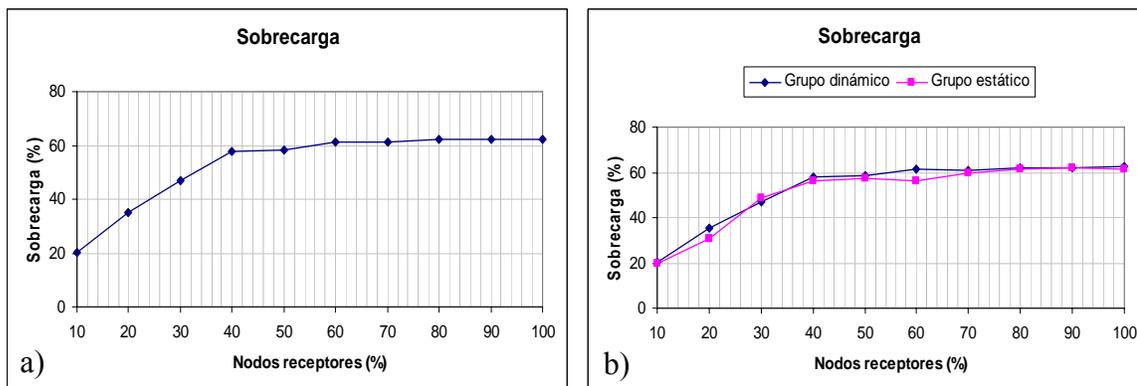


Figura 59. Sobrecarga de red, a) para un grupo dinámico, b) comparación contra un grupo estático.

La figura 59 muestra la gráfica correspondiente a la sobrecarga de red para el escenario 1 simulando con un grupo de multi-difusión dinámico (Fig. 59 a) y una comparación contra la simulación hecha con un grupo estático (Fig. 59 b). Se puede observar que no existe mucha diferencia entre ambos resultados, utilizando un grupo estático ya existe sobrecarga superior al 60%, al utilizar un grupo dinámico de receptores no es mucho lo que se incrementa.

VI.7.2 Escenario 2

Se utilizan las mismas consideraciones de simulación que se definieron para el escenario 2 presentado en la sección VI.6.3. Se hace la simulación del escenario 2 con un grupo de multi-difusión dinámico para obtener los resultados de retardo promedio, sobrecarga de enrutamiento y sobrecarga y de esa manera comparar contra los resultados obtenidos del escenario 2 con grupo de multi-difusión estático.

VI.7.2.1 Retardo promedio.

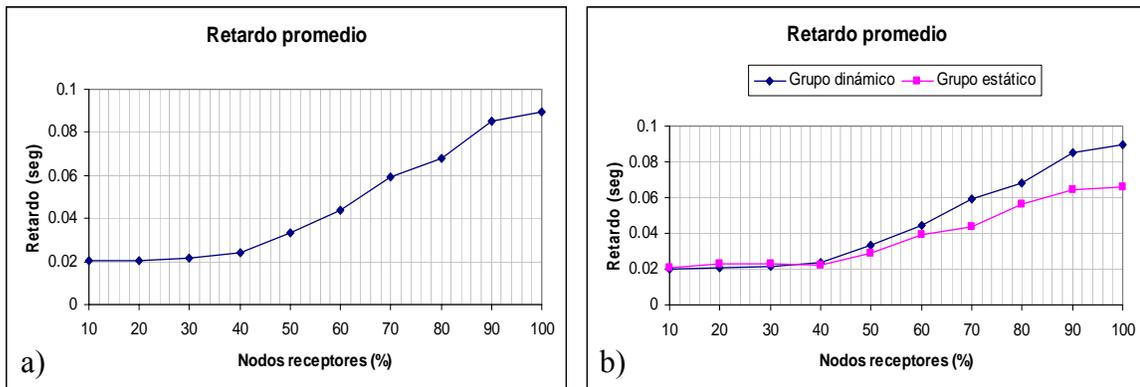


Figura 60. Retardo promedio, a) para un grupo dinámico, b) comparación contra un grupo estático.

La figura 60 muestra el retardo promedio obtenido de simular el escenario 2 con un grupo dinámico de receptores (Fig. 60 a) y una comparación contra el mismo escenario pero con un grupo estático de nodos receptores (Fig. 60 b). En estas gráficas presentadas se observa el impacto de utilizar a un grupo de multi-difusión dinámico, comparado contra los resultados obtenidos usando un grupo de multi-difusión estático.

VI.7.2.2 Sobrecarga de enrutamiento

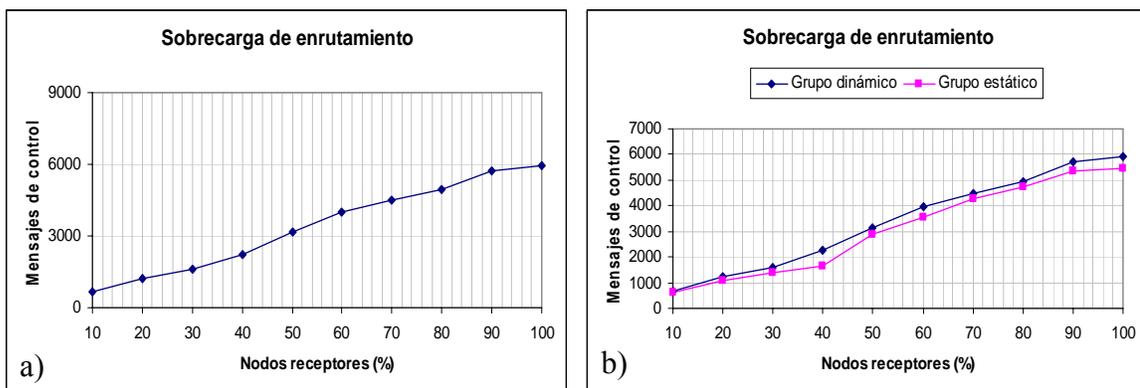


Figura 61. Sobrecarga de enrutamiento, a) para un grupo dinámico, b) comparación contra un grupo estático.

En la figura 61 se muestra la gráfica de la sobrecarga de enrutamiento del escenario 2 utilizando un grupo de multi-difusión dinámico (Fig. 61 a) y una comparación entre los resultados obtenidos de esta métrica usando grupo dinámico y grupo estático (Fig. 61 b). Se puede observar que no hay diferencia significativa entre ambos casos, cuando se tiene un grupo dinámico de receptores, es lógico que se incrementen los mensajes de control, la idea es ver cuánto y que tanto puede afectar a las prestaciones de nuestro mecanismo.

VI.7.2.3 Sobrecarga

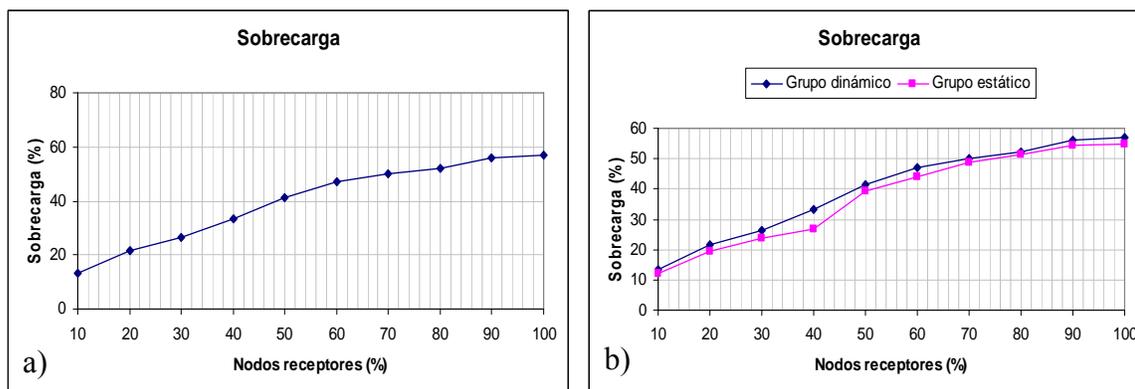


Figura 62. Sobrecarga, a) para un grupo dinámico, b) comparación contra un grupo estático.

La figura 62 presenta la gráfica de la sobrecarga total en la red, para el escenario 2 utilizando un grupo de multi-difusión dinámico (Fig. 62 a) y una comparación contra los resultados obtenidos para un grupo estático (Fig. 62 b). Observando la comparación entre los resultados, se puede observar que el aumento en la sobrecarga que provoca el utilizar un grupo de multi-difusión dinámico no es significativamente grande.

VI.7.3 Escenario 3

Se utilizan los mismos parámetros de simulación que en el escenario 3 presentado en la sección VI.6.4. Se procede a simular usando un grupo de multi-difusión dinámico. Recordemos que el escenario 3 cuenta con 20 nodos móviles, 10 enrutadores inalámbricos, 3 enrutadores cableados, 3 terminales fijas y un enrutador de frontera.

VI.7.3.1 Retardo promedio

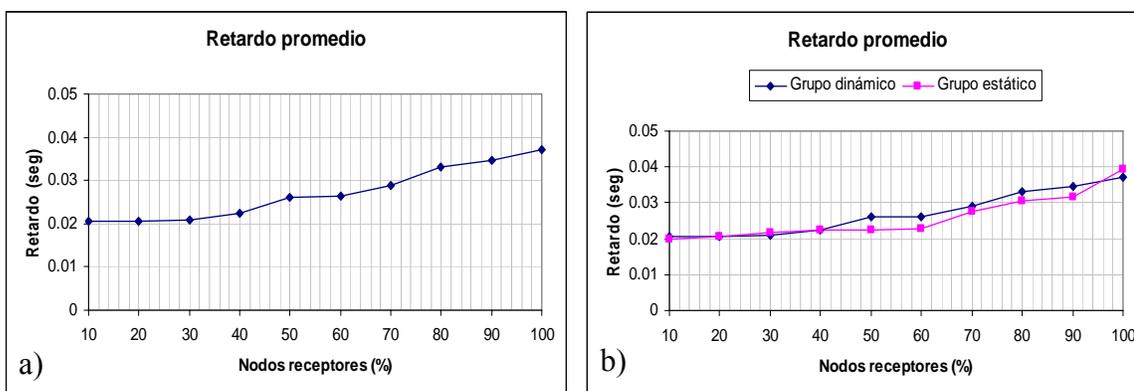


Figura 63. Retardo promedio, a) para un grupo dinámico, b) comparación contra un grupo estático.

La figura 63 muestra la gráfica correspondiente al retardo promedio para el escenario 3 utilizando un grupo dinámico de receptores (Fig. 63 a) y una comparación entre los retardos promedio obtenidos de las simulaciones con grupo estático y con grupo dinámico (Fig. 63 b), se observa que no hay mucha diferencia entre los resultados obtenidos, lo que indica que para este escenario, el parámetro de dinámica de grupo de multi-difusión no tiene demasiado impacto en las prestaciones del mecanismo propuesto.

VI.7.3.2 Sobrecarga de enrutamiento

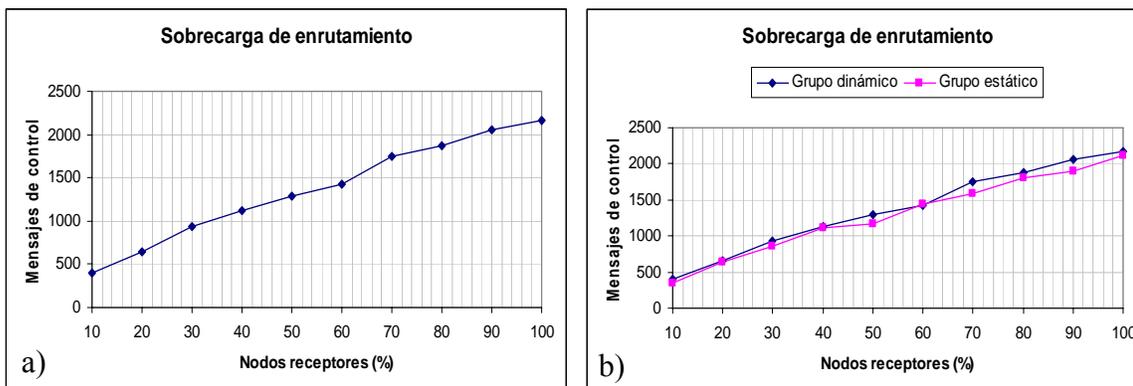


Figura 64. Sobrecarga de enrutamiento, a) para un grupo dinámico, b) comparación contra un grupo estático.

La figura 64 muestra la gráfica de la sobrecarga de enrutamiento resultante de las simulaciones del escenario 3 utilizando un grupo dinámico de receptores (Fig. 64 a) y una comparación de los resultados obtenidos utilizando un grupo dinámico y un grupo estático (Fig. 64 b). Se puede ver que los resultados son muy similares nuevamente, la diferencia en la sobrecarga de un caso y otro no son muy distantes, esto es que al tener un grupo dinámico en la red, se generan más mensajes de control, pero el mecanismo se adapta rápido al cambio y no refleja de manera contundente los cambios sufridos en la red.

VI.7.3.3 Sobrecarga

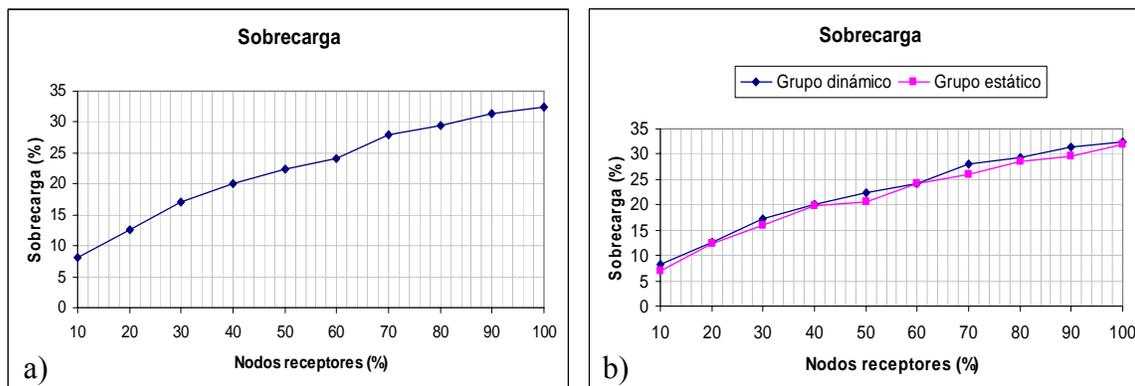


Figura 65. Sobrecarga en la red, a) para un grupo dinámico, b) comparación contra un grupo estático.

En la figura 65 se observa la gráfica correspondiente a la sobrecarga en la red del escenario 3 cuando se utiliza un grupo dinámico (Fig. 65 a) y una comparación de los resultados utilizando un grupo estático y un grupo dinámico (Fig. 65 b). Se observa que los resultados son muy similares, existe un ligero aumento en la sobrecarga cuando se tiene grupo dinámico y esto es lógico, pues cuando se revoca una membresía, se generan nuevos mensajes de control y al haber nuevos miembros, se generan más mensajes de control, pero vemos que este dinamismo no genera sobrecarga extra por cambios de ruta o ruptura de enlaces. Recordando que las simulaciones para este análisis de dinámica de grupo de multi-difusión fueron realizadas con una velocidad máxima de nodo de 1 m/s.

VI.7.4 Escenario 4

Para concluir con todo el análisis de las prestaciones de este mecanismo de interoperabilidad se prueba con el último escenario, se utilizan los mismos parámetros de

simulación que en el escenario 4 presentado en la sección VI.6.5. Se realizan las simulaciones para este escenario con el fin de comparar las métricas cuando se tiene un grupo dinámico con las métricas obtenidas cuando se usa un grupo estático. Al igual que en los escenarios anteriores se evalúan métricas de retardo, sobrecarga de enrutamiento y sobrecarga total para observar el efecto que provoca un grupo de multi-difusión dinámico en la red.

VI.7.4.1 Retardo promedio

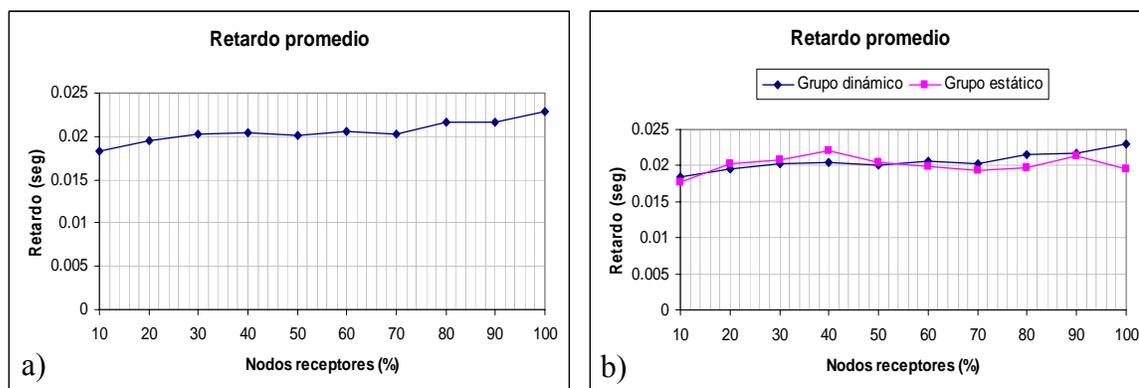


Figura 66. Retardo promedio, a) para un grupo dinámico, b) comparación contra un grupo estático.

La figura 66 muestra la gráfica del retardo promedio para el escenario 4 utilizando un grupo de multi-difusión dinámico (Fig. 67 a) y una comparación entre los resultados de retardo promedio para un grupo estático y para un grupo dinámico (Fig. 67 b).

Al igual que en los casos anteriores, solo se aprecia una diferencia mínima entre los resultados, aunque en este caso tenemos más retardo en algunos puntos de la gráfica

correspondiente al grupo estático, esto se debe a que en el caso de 10 nodos móviles el hecho de que exista dinámica en el grupo de multi-difusión no afecta en lo más mínimo, si se observa, la diferencia entre el valor máximo y mínimo de retardo de ambas gráficas no rebasa ni los 5ms y la diferencia entre el retardo con grupo dinámico y el retardo con grupo estático es menor a 3ms.

VI.7.4.2 Sobrecarga de enrutamiento

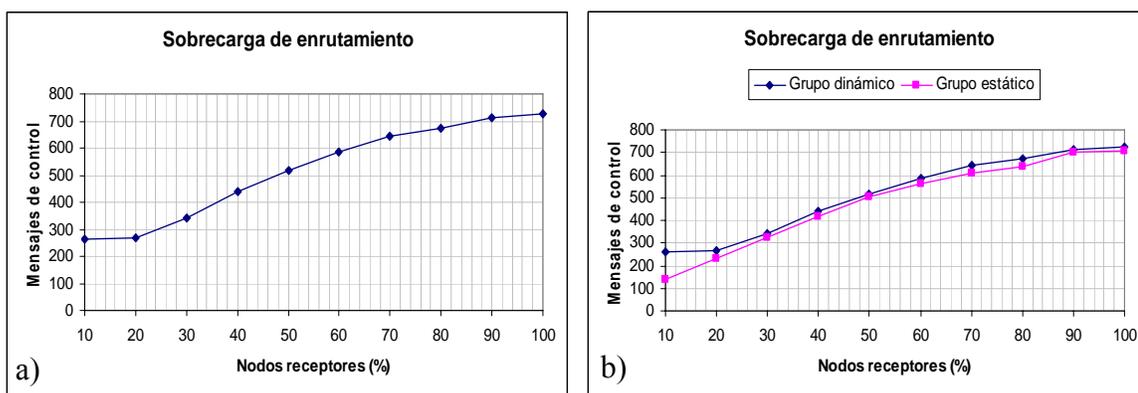


Figura 67. Sobrecarga de enrutamiento, a) para un grupo dinámico, b) comparación contra un grupo estático.

La figura 67 muestra la gráfica correspondiente a la sobrecarga de enrutamiento para el escenario 4 cuando se tiene un grupo de multi-difusión dinámico (Fig. 67 a) y una comparación entre los resultados de la sobrecarga de enrutamiento para el caso de grupo dinámico y grupo estático (Fig. 67 b). Observando los resultados obtenidos, se aprecia que la diferencia entre las gráficas de sobrecarga de enrutamiento es poca, también se observa que causa más sobrecarga de enrutamiento el aumentar el número de nodos receptores que el hacer dinámico al grupo de multi-difusión.

VI.7.4.3 Sobrecarga

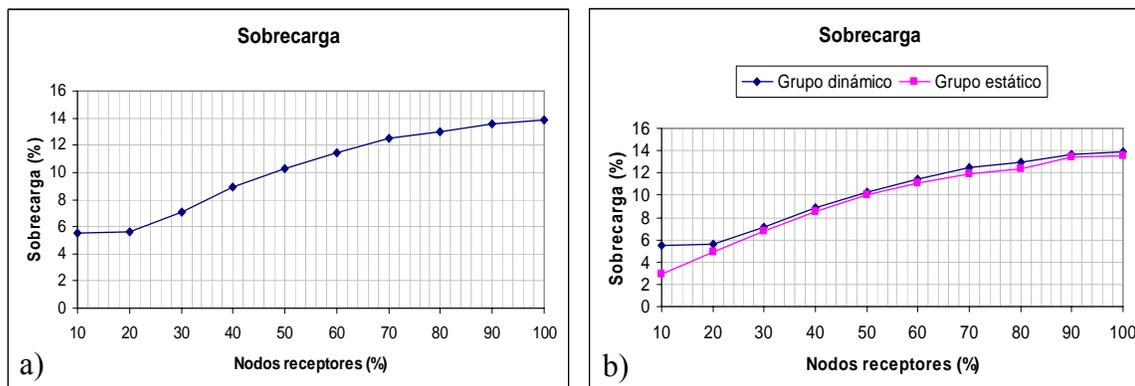


Figura 68. Sobrecarga de la red, a) para un grupo dinámico, b) comparación contra un grupo estático.

La figura 68 muestra los resultados de la simulación del escenario 4 correspondientes a la sobrecarga de la red utilizando un grupo de multi-difusión dinámico (Fig. 68 a) y una comparación contra los resultados de sobrecarga utilizando un grupo estático de receptores (Fig. 68 b). Lo que se observa en esta estadística es que igual que en los escenarios anteriores, el mecanismo no introduce sobrecarga significativa en la red al añadir dinámica en el grupo de multi-difusión, existe incremento de la sobrecarga se debe al tráfico de control generado por revocar membresías y por el tráfico de control generado al agregarse nuevos nodos al grupo de multi-difusión existente.

VI.8 Resumen

En este capítulo se realizó la evaluación de las prestaciones del mecanismo propuesto, el mecanismo propuesto fue simulado en distintos escenarios, con distintos parámetros. De los parámetros más importantes que se evaluaron están: el tamaño de la red, que se evaluó

variando la cantidad de nodos móviles, observando el comportamiento de las métricas y observando cuáles son más susceptibles al tamaño de red. Otro parámetro evaluado es el de la movilidad en la red, en este caso se considera que debido a la aplicación (e.g. redes locales), no se tienen altos grados de movilidad. Se probó para 4 velocidades de nodo, consideradas como comunes en este tipo de redes. Otro parámetro evaluado fue el tamaño de grupo de multi-difusión, variando desde el 10% de los nodos móviles de la red como miembros de grupo, hasta el 100% de ellos. Otro parámetro que se evaluó fue el de la dinámica de grupo de multi-difusión. Se tomó un grupo fijo de nodos receptores que se dan de alta como miembros del grupo de multi-difusión, después de un tiempo, una parte de los nodos revoca su membresía, después se unen algunos otros nodos al grupo, de esta manera se observó cómo se comportaron las métricas para este caso.

En el capítulo siguiente se enumeran las conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro, también las limitaciones de este trabajo y algunos alcances futuros.

Capítulo VII

CONCLUSIONES

VII.1 Conclusiones

El objetivo general de este trabajo de investigación es el de adaptar un mecanismo de multi-difusión para lograr la interoperabilidad entre redes ad hoc y redes cableadas, de manera que el tráfico de multi-difusión proveniente de Internet fuera entregado a clientes dentro de la red ad hoc. Este objetivo general fue completado satisfactoriamente. En la literatura se encontró que la gran mayoría de los trabajos de investigación relacionados con la multi-difusión en redes inalámbricas de tipo ad hoc, se centran en problemas donde la fuente de tráfico está dentro de la misma red ad hoc, de tal forma que solo se concentran en las limitantes de este tipo de dispositivos inalámbricos móviles y portátiles que dependen de baterías y en base a estas limitantes tratan de desarrollar un mecanismo eficiente.

Este trabajo se centró en la entrega de tráfico de multi-difusión desde un servidor conectado en la red cableada, hasta destinos que están en la misma red cableada o en una red inalámbrica. Para tal efecto, fue necesaria la integración de dos protocolos de multi-

difusión, mediante modificaciones hechas a un nodo especializado con dos interfaces, y modificaciones al protocolo de multi-difusión para la red inalámbrica ad hoc.

Después de hacer la implementación en el simulador de redes NS-2 y de que se analizaran los resultados obtenidos, se llegó a las siguientes conclusiones:

- De los parámetros que se evaluaron el que más afecta al mecanismo es el tamaño de la red. En la parte cableada no hay problema porque las terminales están conectadas a un solo enrutador y se mantienen así, los enrutadores cableados no pierden comunicación con sus terminales y el tráfico se entrega sin ningún problema. Sin embargo, en la parte inalámbrica la alta densidad de nodos provoca la pérdida de paquetes, un incremento en el retardo y una alta sobrecarga. Este es un problema en general de las redes inalámbricas debido a diversos factores como la competencia por el medio de transmisión, la presencia de colisiones, entre otras. Se observó que al ser la red muy grande (en términos de la densidad de nodos) el mecanismo no tiene un muy buen desempeño.

- Otro parámetro que afecta al buen desempeño del mecanismo es el tamaño del grupo de multi-difusión. Este parámetro ocasiona que las métricas se vean afectadas notablemente cuando en la red la cantidad de nodos receptores se incrementa, provoca una mayor pérdida de paquetes, incremento en el retardo y mayor sobrecarga en la red, en la literatura se mencionaba que cuando el grupo de multi-difusión era muy grande, la mejor solución era un mecanismo de multi-difusión basado en malla o bien, en soluciones de tipo enrutamiento jerárquico [Mohapatra et al., 2005].

- El parámetro de *dinámica del grupo de multi-difusión* solo afectó significativamente al retardo en el escenario 1. En las demás métricas no se reflejó un impacto notable. El parámetro de *dinámica del grupo de multi-difusión* solo resultó en un poco más de sobrecarga, por lo que este mecanismo se comporta estable al haber cambio en el estado de las membresías durante la simulación.

- El parámetro de movilidad en el intervalo de 0 – 3 m/s no fue un factor que afectara demasiado al desempeño del mecanismo propuesto, la diferencia entre los resultados obtenidos a distintas velocidades es poco significativa, esto se debe a que se consideró un grado de movilidad bajo en la arquitectura de red propuesta en este proyecto, por tal motivo no existen cambios significativos en la topología de la red, ni ocurren demasiadas rupturas en los enlaces de comunicación entre los nodos.

VII.2 Aportaciones

- Como primera aportación está el hecho de lograr integrar una red inalámbrica ad hoc con la red cableada, en el sentido de que se logró que el tráfico de multi-difusión que se origina en la parte cableada llegue a los nodos de la parte inalámbrica sin problemas de excesiva sobrecarga y de inundación, que son características propias de los protocolos de multi-difusión para redes cableadas.

- Como segunda aportación está el Enrutador de Frontera, este nodo especializado tiene la característica de tener instalados los 2 protocolos de multi-difusión utilizados y tiene la

capacidad de filtrar el tráfico proveniente de la red cableada y dejar pasar a la red inalámbrica solo el tráfico de datos de multi-difusión. En este nodo se hicieron varias modificaciones para lograr que los dos mecanismos tuvieran una correcta interoperabilidad.

- Como tercera aportación están las modificaciones hechas al simulador NS-2.26 para lograr que este mecanismo trabajara, se instalaron extensiones a la versión original con el protocolo MAODV, se le agregaron otras extensiones para lograr trabajar en redes híbridas sin utilizar el enrutamiento jerárquico, y otras modificaciones en los archivos de la biblioteca del simulador NS para extender sus funcionalidades.

- Como cuarta aportación está la evaluación del desempeño del mecanismo utilizando los parámetros que afectan a las redes inalámbricas y no solo utilizando las métricas de calidad de servicio. Antes de ofrecer calidad de servicio con el mecanismo propuesto, es importante ver cómo trabaja y cómo se adapta ante diversas topologías.

VII.3 Trabajo futuro

Originalmente se consideró utilizar una arquitectura heterogénea, considerando dispositivos trabajando con el estándar 802.16 y 802.11. Pero finalmente se decidió trabajar en una arquitectura que incluye nodos con interfaz cableada, nodos con dos interfaces y nodos con una interfaz de radio; los nodos con una interfaz de radio se configuraron para tener distinta potencia de transmisión, entonces se propone como trabajo futuro los siguientes aspectos:

- Se propone utilizar múltiples interfaces de radio y extender la funcionalidad de la red ad hoc propuesta, como una arquitectura tipo malla. Es decir, hacer la extensión de este trabajo para tener tráfico de multi-difusión de la red cableada hacia una red inalámbrica tipo malla con múltiples interfaces.

- Se propone crear un escenario con más de un Enrutador de Frontera, para lograr entregar de manera más eficiente el tráfico de multi-difusión, mejor selección de rutas y reducir el tráfico dentro de la red inalámbrica.

- Se propone realizar las modificaciones necesarias para evaluar al mecanismo con más de un grupo de multi-difusión, porque para este trabajo solo se consideró un grupo de multi-difusión. Entonces proponer un escenario donde se tengan dos o más grupos de multi-difusión y nodos que pertenezcan a uno o más grupos de multi-difusión.

- Otra propuesta es el de mejorar este mecanismo, y simularlo utilizando tecnologías más actuales (i.e. 802.11 a/b/g/n) y el de utilizar modelos de propagación más parecidos a la realidad que introduzcan la probabilidad de pérdida de bits o de paquetes debido a desvanecimientos, interferencia o ruido en el canal y no solamente tomando en cuenta un canal casi ideal, parte de esta propuesta es el de hacer que los nodos puedan manejar también 802.15 para crear redes de área personal e integrar multi-difusión en estas redes que hasta la fecha son de punto a punto.

Referencias

Krishnamurthy S. V y Mohapatra P. 2005. "Ad hoc Networks. Technologies and Protocols". Ed. Springer, 270 p.

De Morais C. C., Gossain H. y Agrawal, 2003, "Multicast over wireless mobile ad hoc networks: present and future directions". D.P. Network, IEEE; 17(1):52-59.

Durst R. C.; Scott K.; Zukoski M.J.; Raghavendra C.S.; 2001 "Comparing multicast protocols in mobile ad hoc networks". Aerospace Conference, 2001, IEEE Proceedings. 3:1051-1063.

Beini Ouyang, Xiaoyan Hong y Yunjung Yi. 2005. "A comparison of reliable multicast protocols for mobile ad hoc networks". IEEE Proceedings SoutheastCon. 1(8):339-344.

Gui C. y Mohapatra P. 2004. "Scalable Multicasting in Mobile Ad hoc Networks". INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. 3:2119-2129.

Cheng H., Cao J. y Wang X. 2006. "A Heuristic Multicast Algorithm to Support QoS Group Communications in Heterogeneous Network". IEEE Transactions on Vehicular Technology, 55(3):831-838.

Ying G., Lamont L., Villasenor-González L. 2005. "Hierarchical OLSR - a scalable proactive routing protocol for heterogeneous ad hoc networks"; IEEE International Conference on Wireless And Mobile Computing, Networking And Communications (WiMob'2005). Montreal, Canada. Agosto 22-24. 3:17-23.

Viswanath, K., Obraczka K., Tsudik G. 2006. "Exploring mesh and tree-based multicast. Routing protocols for MANETs". IEEE Transactions on Mobile Computing. 5(1):28-42.

Haas Z. J., Halpern J. Y., Li Li. 2002. "Gossip-based ad hoc routing" INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE. 3(1):1707-1716.

Gui C. y Mohapatra P. 2003. "Efficient Overlay Multicast for Mobile Ad hoc Networks," Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2003 IEEE, New Orleans, Marzo 16-20, 2:118-1123.

Chandra R., Ramasubramanian V., Birman K. P. 2001. "Anonymous Gossip: Improving multicast reliability in mobile ad-hoc networks". International Conference on Distributed Computing Systems. Meza, AZ. Abril 16-19. pp. 275-283.

Wen-Lin Yang 2005. "Constructing energy-efficient multicast trees with delay constraints in ad hoc networks". 19th International Conference on Advanced Information Networking and Applications. AINA 2005. Taipei, TAIWAN. 28-30 Marzo 1:414-419.

Luo J., Eugster P. T., Hubaux J. 2003. "Route driven gossip: probabilistic reliable multicast in ad hoc networks" INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. IEEE. 3:2229-2239.

Jiang H., Cheng S., He Y., y Sun B. 2002. "Multicasting along energy-efficient meshes in mobile ad hoc networks" Wireless Communications and Networking Conference, 2002. WCNC2002. IEEE. Orlando FL. 17-21 Marzo. 2:807-811.

Beongku A. y Papavassiliou S. 2001. "A mobility-based hybrid multicast routing in mobile ad-hoc wireless networks"; Military Communications Conference, 2001. MILCOM 2001. Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force. IEEE. Washington, D.C. Octubre 28-31. 1:316-320.

Yang De-Nian, Chen, Ming-Syan, 2005. "Bandwidth-Efficient Multicast in Heterogeneous Wireless Networks" Emerging Information Technology Conference. Agosto 15-16. 4 p.

Wang Y.H., Hsu, C.P., Lai J.Y. 2004. "A Mobile IPv6 based Seamless Handoff Strategy for Heterogeneous Wireless Networks". IEEE International Conference on Computer and Information Technology (CIT'04). Wuhan, China. Septiembre 14-16. pp 600-6005

Lin C. y Kai-Min W. 2000 "Mobile Multicast Support in IP Networks". INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE. Marzo 26-30. 3(1):1664-1672.

Royer E. y Perkins C. E. 1999. "Multicast Operation of the Ad-hoc On Demand Distance Vector Routing Protocol". In MobiCom '99: Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE International conference on mobile computing and networking. Seattle, WA. Agosto 15-19. pp 207-218.

Zhu Y. y Kunz T. 2004. "MAODV Implantation for NS-2.26"; System and Computing Engineering, Carleton University, Technical Report SCE-04-01. 16 p.

Royer E. y Perkins C. 2000. "Multicast Ad hoc On-Demand Distance Vector (MAODV) Routing"; IETF Internet Draft, draft-ietf-manet-maodv-00.txt.
<http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-maodv-00>. Abril 2007.

Perkins C. E., Royer E. M. y Das S. R. 2003. “Ad hoc On Demand Distance Vector (AODV) Routing”. RFC 3561. <http://www.faqs.org/rfcs/rfc3561.html>. Junio 2007.

Waitzman D, Partridge C y Deering S, 1988."Distance Vector Multicast Routing Protocol"; RFC 1075. <http://www.faqs.org/rfc/rfc1075.html>. Mayo 2007.

Pusateri T. 2003. “Distance Vector Multicast Routing Protocol version 3”. Internet Draft. Draft-ietf-idmr-dvmrp-v3-11.txt. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-idmr-dvmrp-v3-11.txt>. Mayo 2007.

Fenner W. 1997. “Internet Group Management Protocol, Version 2” RFC 2236. <http://www.faqs.org/rfcs/rfc2236.html>. Junio 2007.

Deering Steve. 1989. “Host Extension for IP Multicasting”; RFC 1112. <http://www.faqs.org/rfcs/rfc1112.html>. Junio 2007

Estrin D., Farinacci D., . 1998. “Protocol Independent Multicast – Sparse Mode (PIM-SM): Protocol Specification”; RFC 2362. <http://www.faqs.org/rfcs/rfc2362.html>. Junio 2007.

Adams A, Nicholas J y Siadak W, 2005. “Protocol Independent Multicast - Dense Mode (PIM-DM): Protocol Specification (Revised)”. RFC 3973. <http://www.faqs.org/rfcs/rfc3973.html>. Junio 2007.

Ballardie T, Francis P, Crowcroft J, 1993. “Core Based Trees (CBT) An Architecture for Scalable Inter-Dominian Multicast Routing”, ACM SIGCOMM Computer Communication Review, volume 23, Issue 4, pp. 85-95.

Aquino-Santos R., Villaseñor-González L., Sánchez J., Gallardo J. 2007. “Routing Strategies for Wireless Sensor Network”, First IFIP Internacional Conference on Gíreles Sensor And Actor Networks (WSAN 2007). Albacete, Spain. Septiembre 24-27.

McGee J., Karir M., Baras J. S. 2004. “Implementing Ad Hoc to Terrestrial Network Gteways”. 2nd International Conference on Wired/Wireless Intenet Communications (WWIC 2004), Frankurt, Germany, Febrero 05-07. pp. 132-142.

McCanne S., Floyd S. “ns Networks Simulator”. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Diciembre 2007.

Altman E., Jiménez T., 2003 “NS Simulator for beginners” Lecture notes, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela and ESSI, Sophie-Antipolis, France, p 145.

Fall K., Varadhan K. 2007 “The ns manual” VINT project. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Enero 2007.

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

Williamson B. 2000. “Developing IP Multicast Networks”. Indianapolis: Cisco Press. 592 p

Cisco Systems. 2004 “Internetworking Technologies Handbook” Cisco Press. 1128 p.

Apéndice A

Modelos de propagación de Radio para 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 [Fall y Varadhan, 2007].

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

A.1 Modelo de Espacio Libre (Free Space)

El modelo de propagación de espacio libre supone condiciones de propagación ideales donde sólo existe una trayectoria de visibilidad entre el transmisor y el receptor. En el modelo espacio libre se utiliza la ecuación de Friss, que nos ayuda a calcular la potencia en el espacio libre a una cierta distancia del transmisor [Fall y Varadhan, 2007].

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (3)$$

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.

A.1.1 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 la tasa de entrega paquetes PDR (Packet Delivery Ratio) contra la distancia entre los nodos.

La PDR se define como el número total de paquetes de datos que se reciben entre el número total de paquetes de datos 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.

La figura 69 muestra que mientras el valor de la potencia recibida esté por encima del umbral de detección, todos los paquetes serán marcados como válidos, manteniéndose la PDR constante hasta cuando la distancia excede del límite puesto, que en este caso es de 600 m.

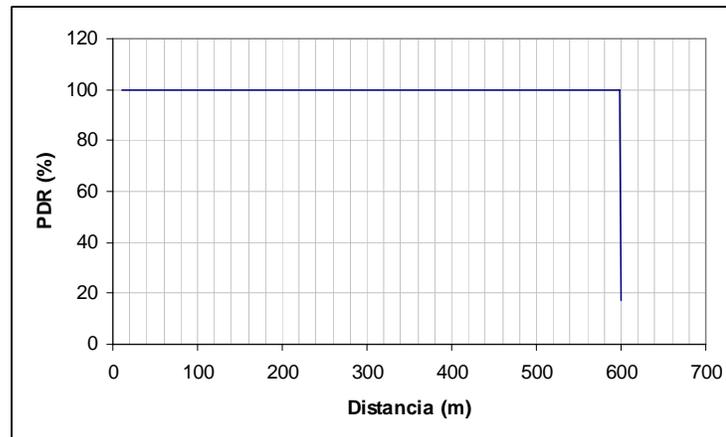


Figura 69. Comportamiento de la PDR con respecto a la distancia en el modelo de espacio libre.

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

Puesto que el trayecto de visibilidad entre dos nodos móviles es no 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. La potencia recibida en una distancia d es:

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

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

La ecuación (4) muestra un decaimiento de la potencia más rápido que la ecuación (3) conforme la distancia se incrementa. Sin embargo, el modelo de dos rayos no entrega buenos resultados para distancias cortas, debido a la oscilación causada por la combinación

destruktiva y constructiva de los dos rayos. Por ello, el modelo de Espacio Libre se sigue usando para casos donde la d es pequeña.

Para solucionar este problema, se calcula una distancia d_c llamada distancia cross-over para este modelo. Cuando $d < d_c$ se usa la ecuación (3). Cuando $d > d_c$ se usa la ecuación (4). 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.

$$d_c = \frac{(4\pi h_t h_r)}{\lambda} \quad (5)$$

A.2.1 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.

La figura 70 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.

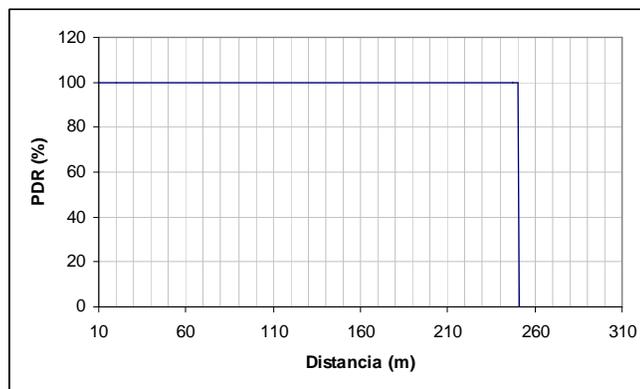


Figura 70. Comportamiento del PDR con respecto a la distancia en el modelo de 2 rayos.

A.3 Modelo de sombreado (Shadowing)

El modelo de espacio libre y el modelo de dos rayos predicen la potencia recibida como una función determinística de la distancia. Estos modelos presentan al 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 multirrayectoria, los cuales son conocidos también como efectos de desvanecimiento. Los modelos anteriores predicen la potencia media recibida a una cierta distancia. Un modelo más general y amplio es llamado de sombreado (*Shadowing*).

El modelo de sombreado consiste en dos partes. La primera parte es conocida como modelo de pérdida de trayecto, la 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:

$$\frac{P_r(d_0)}{P_r(d)} = \left(\frac{d}{d_0}\right)^\beta \quad (6)$$

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 (3) conocemos $\beta = 2$ para la propagación en espacio libre. $P_r(d)$ se calcula de la ecuación (3).

La pérdida de trayectoria se mide en dB. De la ecuación (6) tenemos:

$$\left[\frac{\overline{P_r(d)}}{P_r(d_0)} \right]_{dB} = -10\beta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (7)$$

La tabla IX 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 IX. 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.

El modelo completo se muestra a continuación.

$$\left[\frac{P_r(d)}{P_r(d_0)} \right]_{dB} = -10\beta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{dB} \quad (8)$$

donde X_{dB} es una variable aleatoria Gaussiana con media cero y variación estándar σ_{dB} . A la ecuación (8) 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 de campo. La tabla X muestra algunos valores típicos de σ_{dB} .

Tabla X. 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.

A.3.1 Simulación

Se utiliza 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 obstáculos. Esto porque se adecua más al escenario que se propone en la tesis.

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.

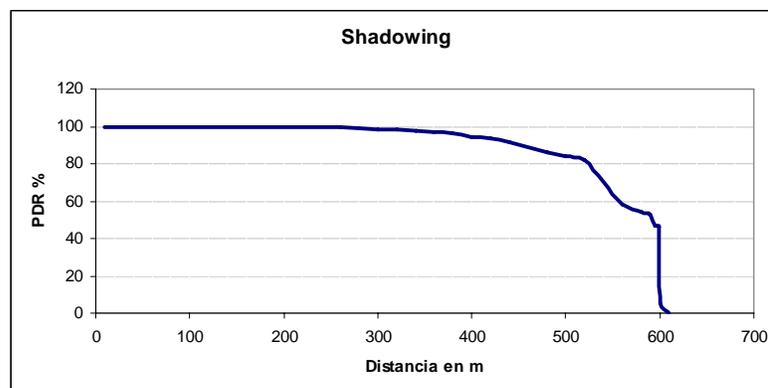


Figura 71. Comportamiento del PDR respecto a la distancia para una $\beta = 2$.

Cuando se tiene un valor de $\beta = 2$, es como si tuviéramos solo el espacio libre, de manera que podemos observar en la figura 71 que 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 72 se muestra una comparación entre los modelos Espacio Libre y Sombreo, vemos claramente la diferencia entre ellos. La figura 73 muestra el comportamiento de la PDR para una $\beta = 2.5$, la figura 74 muestra el comportamiento de la PDR para una $\beta = 2.75$, la figura 75 muestra el comportamiento de la PDR para una $\beta = 3$ y la figura 76 muestra el comportamiento de la PDR para una $\beta = 3.25$.

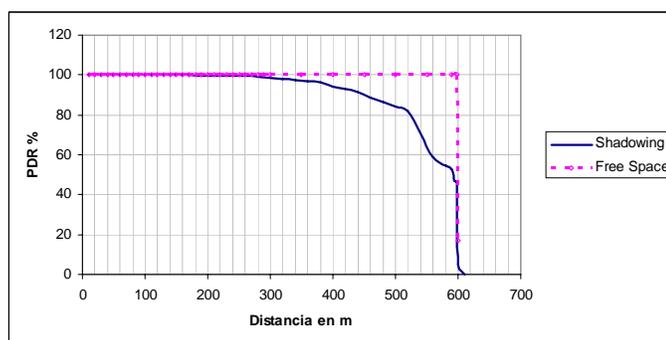


Figura 72. Comparación entre los modelos Espacio Libre y Sombreo.

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

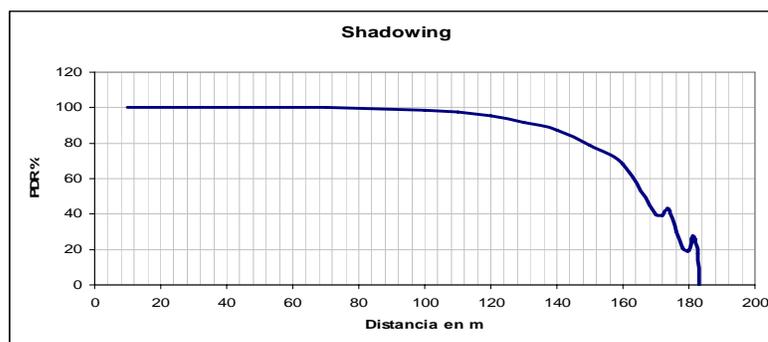


Figura 73. Respuesta del PDR respecto a la distancia, usando $\beta = 2.5$.

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

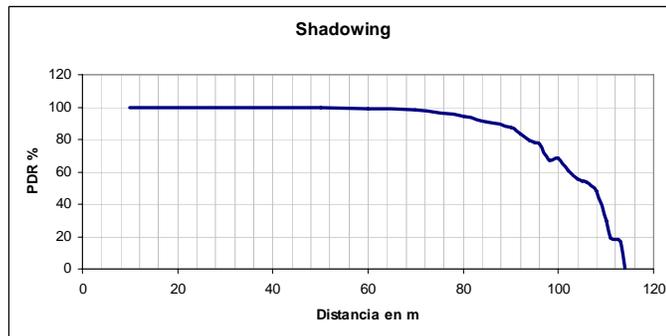


Figura 74. Respuesta del PDR respecto a la distancia, usando $\beta = 2.75$.

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

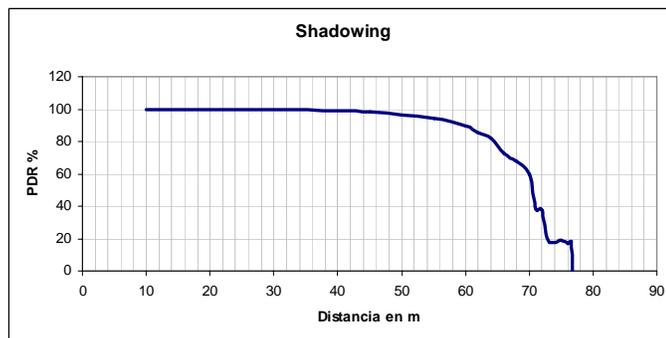


Figura 75. Respuesta del PDR respecto a la distancia, usando $\beta = 3$.

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



Figura 76. Respuesta del PDR respecto a la distancia, usando $\beta = 3.25$.

A.4 Conclusiones

El modelo de sombreado se apega más a la realidad que los modelos de dos rayos y el de espacio libre, podemos ver que mientras la 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 observó que al aumentar el valor del parámetro 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.

