

TESIS DEFENDIDA POR
Gabriel Alejandro Galaviz Mosqueda
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Salvador Villarreal Reyes

Codirector del Comité

Dr. Raúl Teodoro Aquino Santos

Codirector del Comité

Dr. Victor Rangel Licea

Miembro del Comité

Dr. Raúl Rivera Rodríguez

Miembro del Comité

Dr. Jaime Sánchez García

Miembro del Comité

Dr. Luis Armando Villaseñor González

Miembro del Comité

Dr. César Cruz Hernández

*Coordinador del programa de posgrado
en Electrónica y Telecomunicaciones*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

Director de Estudios de Posgrado

28 de Febrero de 2013

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



Programa de Posgrado en Ciencias
en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Telecomunicaciones

Diseño de algoritmos de enrutamiento para VANETs en escenarios tipo carretera

Tesis

Que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Doctor en Ciencias

Presenta:

Gabriel Alejandro Galaviz Mosqueda

Ensenada, Baja California, México
2013

RESUMEN de la tesis de **Gabriel Alejandro Galaviz Mosqueda**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de DOCTOR EN CIENCIAS en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Telecomunicaciones. Ensenada, Baja California. Febrero 2013.

Diseño de algoritmos de enrutamiento para VANETs en escenarios tipo carretera

Resumen aprobado por:

Dr. Salvador Villarreal Reyes

Dr. Raúl T. Aquino Santos

Las redes vehiculares ad-hoc, VANETs por sus siglas en inglés, han sido identificadas por la comunidad de investigación, los gobiernos y la industria automotriz como la tecnología capaz de incrementar radicalmente la seguridad y confort de los pasajeros a lo largo de su recorrido. Sin embargo, antes de que las VANETs puedan cumplir con las expectativas generadas es necesario resolver diferentes retos existentes. Una de las principales problemáticas es el diseño adecuado de estrategias de enrutamiento que provean conectividad aún bajo una topología de red altamente dinámica y de las difíciles condiciones de propagación impuestas por los escenarios vehiculares.

Debido a la importancia y extensión de la infraestructura carretera en la mayoría de los países, las VANETs en este tipo de escenarios han adquirido una gran relevancia. Para este tipo de escenarios, tanto la alta movilidad de los vehículos como las condiciones de propagación pueden afectar el desempeño de la estrategia de enrutamiento. Estas problemáticas han sido abordadas solo de manera parcial. De hecho, se han propuesto diferentes estrategias de enrutamiento para la disseminación de mensajes en los escenarios tipo carreta. Sin embargo, la mayoría de estos protocolos no consideran en su diseño los efectos del canal inalámbrico sobre la disseminación de un mensaje.

En este trabajo de tesis se aborda el diseño de estrategias de enrutamiento para escenarios tipo carretera considerando los efectos del canal inalámbrico. Particularmente, se diseñó una estrategia de enrutamiento *unicast* y otra *broadcast*, las cuales obtienen una alta tasa de entrega de paquetes y reducen el retardo punto a punto en escenarios tipo carretera. Esto, cuando son evaluadas en condiciones de movilidad y de propagación realistas contra los protocolos líderes en el estado del arte.

Palabras Clave: **Enrutamiento, VANETs, canal radio, técnica de supresión de *broadcast*.**

Abstract of the thesis presented by Gabriel Alejandro Galaviz Mosqueda, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science in Electronics and Telecommunications with orientation in TELECOMMUNICATIONS. Ensenada, Baja California, February 2013.

Design of routing algorithms for VANETs in highway scenarios

Abstract approved by:

Dr. Salvador Villarreal Reyes

Dr. Raúl T. Aquino Santos

Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs) are considered by car manufacturers and the research community as the enabling technology to radically improve the safety, efficiency and comfort of everyday driving. However, before VANET technology can fulfill all its expected potential, several difficulties must be addressed. One key issue arising when working with VANETs is the proper design of the routing strategy even under the highly dynamic topology and the hard propagation conditions imposed by vehicular channel.

Highways represent a large amount of existing roads in many countries. Therefore, deploying VANETs in this kind of scenarios becomes very relevant. For this scenario, several important issues such as the mobility of vehicles and the propagation conditions may affect the performance of the routing strategy. These constraints have only been partially addressed in previous proposals. In fact, in order to disseminate information in highways, several routing protocols have been proposed. However, most of them do not consider the effects of the wireless radio channel in its design.

This thesis is focused on the design of routing strategies for VANETs deployed in highway scenarios considering the effects of the wireless channel. Particularly, a *unicast* routing strategy and a *broadcast* strategy were developed. The performance of the introduced strategies was compared to the leading protocols in each area (*unicast* and *broadcast*). Performance metrics show that, when considering realistic mobility and propagation conditions, the introduced strategies achieve a higher packet dissemination ratio and a lower end-to-end delay.

Keywords: Routing, VANETs, radio channel, suppression *broadcast* technique.

*A Jocka, mi esposa, por ser el
faro que en la zozobra alumbra
mi camino.*

*A mis padres y hermanos, por
ser el podio de mis ilusiones
ahora concretadas.*

Agradecimientos

Al Dr. Salvador Villarreal, por su amistad y por el apoyo irrestricto a mi trabajo justo cuando fue más necesario.

Al Dr. Raúl Aquino por su guía, su amistad y por colocarme en el sendero de una carrera que me apasiona.

A mis sinodales los doctores Víctor Rangel, Raúl Rivera, Jaime Sánchez y Luis Villaseñor que con sus aportaciones ayudaron en gran medida a la consecución de este trabajo.

Al Dr. David Covarrubias por su apoyo y amistad a lo largo de mi estancia en CICESE.

Al Maestro Arthur Edwards, por su amistad y buenos consejos.

A los amigos que hicieron menos sinuoso el camino: Armando, Christian, Edwin, Leo, Lily, Memo y Pedro.

A mis compañeros, por su amistad, Vero, Miriam, Enrique, Manuel, Shiro, Polo, Carlos y muchos otros para listar.

Al CICESE, crisol de mi formación académica y personal.

Al CONACyT porque este trabajo fue posible gracias al apoyo brindado a través de una beca recibida a lo largo de mis estudios.

A Memo cortés y su esposa Martha, gracias por darme un lugar en su familia.

A mi familia por alentarme y estar conmigo aun a la distancia.

A mi esposa Jocka, por su apoyo y comprensión a lo largo de estos años.

CONTENIDO

	Página
Resumen español	i
Resumen inglés	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Lista de Figuras	viii
Lista de Tablas	xi
Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.1.1 Diseño de algoritmos de enrutamiento en VANETs	6
1.2 Planteamiento del problema	8
1.2 Objetivos	11
1.2.1 Objetivo general	11
1.2.2 Objetivos específicos.....	11
1.3 Metodología	12
1.5 Organización de la tesis.....	13
1.6 Contribuciones del trabajo de tesis.....	14
Redes vehiculares ad-hoc	16
2.1 Redes móviles ad-hoc	16
2.2 VANETS.....	18
2.3 Aspectos relevantes de la propagación en un canal inalámbrico.....	18
2.3.1 Perdidas por propagación	19
2.3.2 Estadísticas de desvanecimientos	19
2.3.3 Perfil de retardo de potencia	20
2.3.4 Espectro doppler	20
2.4 Escenarios de despliegue	21
2.4.1 Características del escenario de carreteras.....	24
2.4.1.1 Propagación.....	24
2.4.1.2 Movilidad.....	26
2.5 Tipos de aplicaciones	28
2.6 Mecanismos de enrutamiento	29
2.7 Tecnologías de comunicación inalámbrica utilizadas en VANETs.....	30
2.8.1 IEEE 802.11p	31
2.8.1.1 Capa física	31
2.8.1.2 Acceso al medio	32
2.8 Otros retos en el despliegue de las VANETs	34
2.9 Resumen.....	34

Protocolos de enrutamiento para VANETs en redes vehiculares.	37
3.1 <i>Unicast</i>	37
3.1.1 Mecanismo de envío de paquetes PIT	39
3.1.2 Servicio de descubrimiento de posición (SDP).....	42
3.1.3 Diseminación de datos	42
3.1.4 Algoritmo de predicción de Posición	44
3.1.6 Métricas de desempeño	44
3.1.5 Estado del arte en los algoritmos de encaminamiento <i>unicast</i> enfocados a VANETs.....	45
3.2 Algoritmos de diseminación de <i>broadcast</i>	53
3.2.1 Clasificación	54
3.2.2 Módulos básicos de un protocolo de diseminación asistido orientado al transmisor.....	58
3.2.2.1 Mecanismo de envío de PITs	58
3.2.2.2 Algoritmo de predicción de posición	59
3.2.2.3 Técnica de supresión de <i>broadcast</i> (TSB).....	59
3.2.2.4 Estrategia de retransmisión	60
3.2.2.5 Métricas de evaluación	60
3.2.2 Estado del arte en algoritmos de diseminación de <i>broadcast</i> orientados al transmisor.....	61
3.3 Resumen.....	68
Diseño y evaluación de un algoritmo de encaminamiento <i>unicast</i> para VANETs enfocado a escenarios tipo carretera.....	70
4.1 Introducción	70
4.1 Algoritmo de selección del siguiente salto	71
4.1.1 Algoritmo de predicción.....	72
4.1.2 Algoritmo de selección MFWAR.....	73
4.2 Mecanismo de intercambio de paquete de información topológica.....	76
4.3 Servicio de localización.....	76
4.3.1 Descubrimiento de posición	77
4.3.2 Estrategia de redundancia.....	78
4.3.2.1 Mecanismo de acuse de recibo implícito	79
4.3.2.2 Selección del nodo de respaldo (<i>BN</i>)	80
4.4 Diseminación de datos.....	81
4.5 Máquina de estados y diagramas de flujo de FPBR	82
4.6 Resumen.....	84
Evaluación del desempeño de FPBR	85
5.1 Protocolo de referencia	85
5.2 Estándar IEEE 802.11p	86
5.3 Escenario de evaluación.....	86
5.4 Análisis de resultados	88
5.4.1 Resultados en el espacio libre.....	88
5.4.2 Resultados considerando el modelo de propagación para el canal V2V ...	90
5.5 Resumen.....	98

Diseño y evaluación de un algoritmo de enrutamiento <i>broadcast</i> para VANETs enfocado a escenarios tipo carretera.....	100
6.1 Mecanismo de intercambio de PITs.....	101
6.1.1 Antecedentes.....	102
6.1.2 Factor de velocidad (γ).....	104
6.1.3 Factor de densidad (δ).....	105
6.2 Sistema de inferencia para el cálculo de la frecuencia de emisión de PITs...	107
6.2.1 Fusificación.....	109
6.2.2 Base de reglas lógicas.....	110
6.2.3 Desfusificación.....	111
6.3 Técnica de supresión de <i>broadcast</i> (TSB).....	112
6.3.1 MFWAR con máximo avance.....	114
6.3.2 Mecanismo de acuse de recibo implícito.....	114
6.3.3 Algoritmo de predicción.....	115
6.4 Diagramas de flujo.....	116
6.5 Evaluación del desempeño.....	116
6.5.1 Protocolo de referencia.....	117
6.5.2 Escenario de evaluación.....	118
6.5.3 Métricas de desempeño.....	119
6.4.4 Análisis de resultados.....	119
6.4.4.1 Resultados considerando la propagación tipo Nakagami.....	119
6.4.4.2 Resultados obtenidos considerando el modelo de propagación para comunicaciones V2V.....	120
6.4.4.3 Conclusiones.....	124
6.5 Resumen.....	125
Conclusiones y trabajo futuro.....	127
7.1 Conclusiones.....	127
7.1.1 Conclusiones sobre el diseño de algoritmos de enrutamiento <i>unicast</i>	128
7.1.2 Conclusiones sobre el diseño de algoritmos de enrutamiento <i>broadcast</i> ...	130
7.2 Contribuciones.....	130
7.3 Trabajo futuro.....	132
Referencias bibliográficas.....	134

Lista de Figuras

Figura 1. Ejemplos de aplicaciones de seguridad que pueden ser habilitadas a través de las comunicaciones vehículo a vehículo	2
Figura 2. Esquema de la metodología de la tesis	13
Figura 3.- Transmisión de un mensaje en (a) una red con infraestructura; (b) una red ad-hoc.....	17
Figura 4. (a) Ejemplo de una comunicación <i>unicast</i> en una red V2V; (b) ejemplo de una comunicación <i>broadcast</i> en una red V2V.....	29
Figura 5. Registro de un vehículo en la tabla de vecinos a través del intercambio de PITs	41
Figura 6. Posibles aplicaciones habilitadas por los protocolos de encaminamiento <i>unicast</i>	46
Figura 7. Diseminación de un mensaje <i>broadcast</i> para indicar que ha ocurrido un accidente, ejemplo de una aplicación habilitada por un protocolo de difusión <i>broadcast</i>	53
Figura 8. Una clasificación de protocolos de difusión para redes vehiculares ad-hoc (VANETs).....	56
Figura 9. Uso de los factores dinámicos β_s y β_c para ajustar el radio de cobertura nominal, R_n , para vehículos que pertenecen a los conjuntos V_s and V_c . (a) Radio de cobertura nominal R_n ; (b) Radio de cobertura ajustado $\beta_s * R_n$ para vehículos viajando en dirección opuesta y alejándose (conjunto V_s). (c) Radio de cobertura ajustado $\beta_c * R_n$ para vehículos viajando en la misma dirección (conjunto V_c).	75
Figura 10. Ejemplo de la estrategia de redundancia implementada en FPBR. (a) El paquete de descubrimiento llega al nodo BN pero no alcanza al nodo $FN_n + 1$; (b) El nodo BN retransmite el paquete de descubrimiento dado que el paquete de descubrimiento original no alcanzó al nodo $FN_n + 1$	78
Figura 11. Ejemplo del mecanismo de acuse de recibo implícito implementado en FPBR. (a) El retransmisor primario recibe exitosamente el paquete de descubrimiento; (b) El nodo BN recibe exitosamente el acuse de recibo implícito proveniente de $FN_n + 1$	79
Figura 12. Selección del nodo de respaldo (BN) a través del mecanismo MFWAR. El nodo BC2 es seleccionado como BN debido a que es el más cercano a la frontera de la distancia acotada $\beta_{Rc} * d(FN_n, FN_n + 1)$	81

Figura 13. Diagramas de flujo de los principales procesos del protocolo FPBR: (a) el mecanismo de PITs; (b) El servicio de descubrimiento y (c) el servicio de disseminación de datos.	82
Figura 14. Máquina de estados que controla la interacción entre los diferentes módulos del protocolo FPBR	83
Figura 15. Tasa de entrega de paquetes (PDR) y número de saltos (NH) obtenidos cuando se incrementa la aceleración, α . Dos densidades diferentes fueron consideradas para estas gráficas: $\lambda = 133$ y $\lambda = 33$. (a) PDR vs. α ; (b) Número de saltos vs. α	89
Figura 16. Retardo por salto y retardo punto a punto (EED) obtenidos cuando FPBR y DDOR cuando se incrementa el valor de la máxima aceleración, α . Dos densidades diferentes fueron consideradas para estas gráficas: $\lambda = 133$ y $\lambda = 33$. (a) Retardo por salto vs. α . (b) EED vs. α	90
Figura 17. Sobrecarga de red y MAC obtenida para FPBR y DDOR cuando se incrementa el valor máximo de la aceleración, α . Dos densidades diferentes fueron consideradas para estas gráficas: $\lambda = 133$ y $\lambda = 33$. (a) Sobrecarga de red vs. α . (b) Sobrecarga MAC vs. α	90
Figura 18. Tasa de entrega de paquetes (PDR) obtenida para FPBR and DDOR cuando se incrementa la distancia fuente-destino. El valor de la aceleración máxima es fijado a $\alpha = 4$. Dos densidades de vehículos diferentes, $\lambda = 66$ and $\lambda = 133$, fueron consideradas para esta figura.....	92
Figura 19. Número de saltos promedios obtenidos con FPBR y DDOR cuando se incrementa el valor de la máxima aceleración, α . Cuatro densidades de vehículos diferentes, λ , fueron consideradas para estas gráficas. Cada gráfico muestra el número de saltos promedio vs. α para: (a) $\lambda = 133$; (b) $\lambda = 100$; (c) $\lambda = 66$ y (d) $\lambda = 33$	93
Figura 20. Retardo por salto promedio obtenidos con FPBR y DDOR cuando se incrementa el valor de la máxima aceleración, α . Cuatro densidades de vehículos diferentes, λ , fueron consideradas para estas gráficas. Cada gráfico muestra el número de saltos promedio vs. α para: (a) $\lambda = 133$; (b) $\lambda = 100$; (c) $\lambda = 66$ y (d) $\lambda = 33$	94
Figura 21. Retardo punto a punto promedio (EED) obtenido con FPBR y DDOR cuando se incrementa el valor de la máxima aceleración, α . Cuatro densidades de vehículos diferentes, λ , fueron consideradas para estas gráficas. Cada gráfico muestra el número de saltos promedio vs. α para: (a) $\lambda = 133$; (b) $\lambda = 100$; (c) $\lambda = 66$ y (d) $\lambda = 33$	95

Figura 22. Sobrecarga de red normalizada obtenida con FPBR y DDOR cuando se incrementa el valor de la máxima aceleración, α . Cuatro densidades de vehículos diferentes, λ , fueron consideradas para estas gráficas. Cada gráfico muestra el número de saltos promedio vs. α para: (a) $\lambda = 133$; (b) $\lambda = 100$; (c) $\lambda = 66$ y (d) $\lambda = 33$	96
Figura 23. Sobrecarga en MAC normalizada obtenida con FPBR y DDOR cuando se incrementa el valor de la máxima aceleración, α . Cuatro densidades de vehículos diferentes, λ , fueron consideradas para estas gráficas. Cada gráfico muestra el número de saltos promedio vs. α para: (a) $\lambda = 133$; (b) $\lambda = 100$; (c) $\lambda = 66$ y (d) $\lambda = 33$	97
Figura 24. Diagrama a bloques de un sistema de inferencia difusa.....	107
Figura 25 Membresías para el factor de velocidad γ	109
Figura 26 Membresías para el factor de densidad δ	110
Figura 27. Conformación de los conjuntos a través del mecanismo MFWAR	112
Figura 28. Diagramas de flujo del protocolo de difusión propuesto	116
Figura 29 Tasa de diseminación de paquetes (TDP) obtenida para DBMA-PA y FUZZBR cuando se incrementa el valor de la densidad de vehículos, λ	120
Figura 30 TDP, Número de retransmisiones y Retardo obtenidos para DBMA-PA y FUZZBR cuando se disminuye la frecuencia de intercambio de PITs para una densidad de vehículos, $\lambda = 33$	121
Figura 31 Número de retransmisiones por mensaje de datos obtenida para DBMA-PA y FUZZBR cuando se incrementa el valor de la densidad de vehículos, λ	122
Figura 32 Retardo punto a punto obtenido para DBMA-PA y FUZZBR cuando se incrementa el valor de la densidad de vehículos, λ	123
Figura 33 PITs por vehículo por segundo utilizados por DBMA-PA y FUZZBR cuando se incrementa el valor de la densidad de vehículos, λ	123

Lista de Tablas

Tabla 1.- Ejemplo de una matriz de Haddon utilizada para el estudio de la prevención de lesiones en accidentes automovilísticos	3
Tabla 2. Características de los escenarios vehiculares por tipo, i.e. carretera y urbano adaptada de (António Fonseca & Vazão, 2012).	23
Tabla 3. Valores de los parámetros de OFDM para el estándar IEEE 802.11p	31
Tabla 4. Esquemas de modulación y codificación disponibles para el estándar IEEE 802.11p y las tasas de datos alcanzadas con estos esquemas.	32
Tabla 5. Valores de las ventanas mínimas y máximas para las diferentes categorías de acceso en el estándar IEEE 802.11p	33
Tabla 6 Tabla comparativa de los protocolos de enrutamiento <i>unicast</i> mas relevantes en la literatura.....	52
Tabla 7. Protocolos de difusión para redes vehiculares y su respectiva TSB.....	67
Tabla 8. Valores utilizados para los parámetros de la simulación	87
Tabla 9. Base de reglas para el Sistema de inferencia propuesta.....	110
Tabla 10. Parámetros del escenario de evaluación	118
Tabla 11 Métricas obtenidas para DBMA-PA y FUZZBR considerando el modelo de propagación en la cama de pruebas.....	119

Nomenclatura

v_φ	Velocidad del vehículo φ .
a_φ	Aceleración máxima del vehículo φ .
T_φ	Tiempo en el que un vehículo recorre la mínima distancia segura hacia el vehículo frontal
$v_{0\varphi}$	Velocidad máxima permitida para el vehículo φ .
b_φ	Desaceleración confortable del vehículo φ .
s_φ	Espacio entre el vehículo φ y el vehículo frontal.
$s_{0\varphi}$	Distancia de bloqueo.
ω	Exponente de aceleración.
$d_{(T_x, R_x)}$	Es la distancia de propagación ($T_x - R_x$).
d_0	Es la distancia de referencia para las pérdidas por propagación.
PL_0	Son las pérdidas por propagación a la distancia de referencia d_0 .
n	Es el exponente de pérdidas por propagación.
X_σ	Es una variable con distribución normal, media cero y una desviación estándar σ .
PL_c	Término de corrección en las pérdidas por propagación para considerar la dirección relativa en el cálculo final.
ζ	Indicador de la dirección relativa de los vehículos.
P_N	Posición estimada.
P_{act}	Última posición almacenada en la tabla de vecinos.
\hat{v}	Última velocidad almacenada en la tabla de vecinos.
\widehat{acc}	Último vector de aceleración almacenada en la tabla de vecinos.
dt	Tiempo que ha permanecido almacenada una entrada de la tabla de vecinos.
v_μ	Velocidad promedio de los vehículos existentes en la tabla de vecinos.
v_{max}	Máxima velocidad permitida.
N_v	Es el número de entradas en la tabla de vecinos.

$d(x_i, x_j)$	Es la distancia euclidiana entre el nodo i y el vecino j .
R_β	Es el radio de cobertura acotado dependiente de la dirección relativa.
δ_i	Inter-distancia promedio de un nodo a los vehículos registrados en su tabla de vecinos.
$\delta_{i\sigma}$	Es la desviación estándar de la inter-distancia promedio δ_i .
δ_p	Factor de la inter-distancia promedio ponderada.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

En las últimas décadas se ha observado una explosión en el uso de sistemas de comunicaciones inalámbricas en todos los aspectos de la vida común. Idealmente, un sistema inalámbrico está enfocado en proveer conectividad en cualquier lugar y a cualquier hora donde el usuario lo requiera. Así, a partir del deseo de ser capaz de compartir información en cualquier lugar, la tecnología ha evolucionado para permitir la conectividad de los usuarios a las redes de datos de forma ubicua. Con este objetivo en mente, los medios de comunicación inalámbricos han permitido ofrecer servicios y aplicaciones cuyos objetivos van desde proveer medios de entretenimiento hasta mejorar la seguridad de los usuarios. Sin embargo, las comunicaciones inalámbricas no han avanzado al mismo ritmo que el desarrollo de la tecnología móvil. Por ejemplo, actualmente existen dispositivos móviles (e.g. teléfonos, tabletas) que tienen el potencial de extender el área de cobertura de la red con infraestructura a través de conexiones ad-hoc. Sin embargo, aún falta trabajo por realizar en los protocolos de red para proveer de una conectividad segura, transparente y estable para el usuario; así como redituable para el operador.

Recientemente, un área de aplicación de los sistemas de comunicaciones inalámbricas que ha cobrado gran relevancia por sus posibles impactos es en el intercambio de información entre vehículos. Establecer una red de datos para compartir información entre vehículos puede permitir el despliegue de un conjunto de servicios capaces de mejorar radicalmente la seguridad y confort de los pasajeros. Esto, a través de diversas aplicaciones tales como: monitoreo de

tráfico, asistencia en el cambio de carril, control del flujo vehicular, asistencia a vehículos de emergencia, etc. (ver Figura 1).

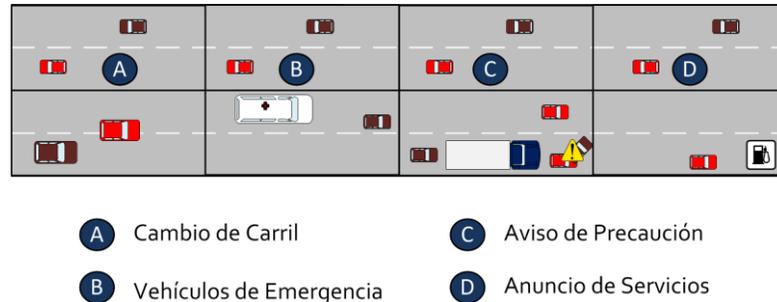


Figura 1. Ejemplos de aplicaciones de seguridad que pueden ser habilitadas a través de las comunicaciones vehículo a vehículo

Entre los tipos de aplicaciones previstos para las VANETs, uno de los más importantes es el de las aplicaciones de seguridad, por ejemplo, la prevención de accidentes o la disminución de sus efectos. Así, a través de las VANETs es posible habilitar aplicaciones que aporten de manera activa a varios de los factores involucrados en escenarios pre-colisión (ver Tabla 1). Por ejemplo, en condiciones climáticas difíciles, es más complicado para los conductores observar las señales de alerta, e.g. aviso de curva peligrosa. En la fase de pre-colisión, una aplicación que informe sobre la presencia de esta curva, puede proveer a los conductores de un sistema auxiliar que le permita realizar una interpretación objetiva, y en tiempo, de dicha señal. Adicionalmente, si el conductor no disminuye su velocidad y la colisión es inminente el vehículo puede tomar medidas preventivas automáticamente como ajustar el cinturón de seguridad. Además, a través del protocolo de enrutamiento, el propio vehículo puede avisar a los demás de una condición peligrosa para que los conductores de éstos tomen las precauciones necesarias. Aún más, después de la colisión, los vehículos que se acercan pueden ser informados que ocurrió un accidente a través de un radiofaro y tomar medidas precautorias como disminuir la velocidad o cambiar de carril para evitar una colisión que involucre más vehículos.

Tabla 1.- Ejemplo de una matriz de Haddon utilizada para el estudio de la prevención de lesiones en accidentes automovilísticos

	Personal	Agente/Vector	Ambiente
Pre-colisión	Fatiga	Condición de los frenos	Visibilidad de las señales
Durante la colisión	Uso del cinturón	Bolsa de aire	Áreas de frenado
Post- colisión	Condición médica preexistente	Señalización del evento	Respuesta de vehículos de emergencia

Para lograr que este tipo de aplicaciones tengan el impacto necesario en el mejoramiento de la seguridad de los pasajeros, es necesario habilitar la comunicación entre los vehículos de manera ubicua. Es decir, es de suma importancia que en cualquier punto a lo largo del recorrido de un vehículo se pueda compartir información con los otros a su alrededor. Hasta ahora, se han propuesto diversas tecnologías de comunicación inalámbrica para el despliegue de las VANETs que incluyen sistemas comúnmente utilizados para redes de área personal (WPANs) tales como Bluetooth (Pasolini & Verdone, 2002), tecnologías para redes de área local como IEEE 802.11b (Naumov & Gross, 2007), hasta estándares para el establecimiento de redes de área metropolitana como WiMAX (Fernández-Caramés, González-López, & Castedo, 2011a). A pesar de que dichas tecnologías han sido exitosas cada una en su ramo de aplicación, una limitante de estas tecnologías es que no fueron diseñadas para habilitar enlaces de comunicaciones vehículo a vehículo. Adicionalmente, aunque también se han propuesto tecnologías basadas en infraestructura ya desplegadas como soporte para este tipo de aplicaciones (Y. Li, Ying, Cheng, Yu, & Luo, 2012), abordar el intercambio de información desde la perspectiva de una red con infraestructura dificultaría el objetivo de proveer conectividad durante todo el recorrido de un vehículo. Esto, debido a que desplegar una red con infraestructura que provea cobertura total, o siquiera significativa, requeriría una inversión considerable (Sichitiu & Kihl, 2008), especialmente en países grandes como EEUU o México. Adicionalmente, las aplicaciones cooperativas de seguridad están basadas en el intercambio periódico de mensajes que contienen información acerca de cada vehículo, como su posición, velocidad, o aceleración (Ghafoor, Bakar, Van

Eenennaam, Khokhar, & Gonzalez, 2011). Este intercambio periódico podría sobrecargar rápidamente una red de infraestructura como LTE, aún bajo condiciones ideales (Vinel, 2012). Esto, debido a la cantidad de recursos necesarios que tendrían que ser asignados para que cada vehículo envíe mensajes cada segundo por ejemplo, esto, aun considerando que los mensajes pudieran requerir una baja tasa de transferencia.

Por otro lado, las comunicaciones vehículo a vehículo (o V2V) pueden habilitar el establecimiento de enlaces en ausencia de cualquier infraestructura subyacente y de una manera más rápida. De hecho, un estudio de la administración nacional para la seguridad del tráfico en carreteras en EEUU (NHTSA por sus siglas en inglés) muestra que cerca del 79% de los escenarios pre-colisión podrían ser resueltos utilizando las comunicaciones V2V. Debido al potencial de las comunicaciones V2V, el instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos (IEEE por sus siglas en inglés) recientemente ha liberado el estándar IEEE 802.11p, el cuál fue específicamente desarrollado para controlar el acceso a la red y regular la utilización del medio en las comunicaciones vehículo a vehículo. Dado que el acceso al medio en este estándar es llevado a cabo de una manera distribuida entre los vehículos que lo comparten, se puede lograr una mejor escalabilidad de la red. Por estas razones, las comunicaciones V2V en las VANETs adquieren una gran relevancia para la habilitación de las aplicaciones de seguridad y de confort. Principalmente las VANETs enfocadas a escenarios donde no es posible o costoso el despliegue de infraestructura para proveer conectividad entre los vehículos. En este contexto, las carreteras son uno de los escenarios más importantes donde es posible habilitar las aplicaciones de seguridad a través de las comunicaciones V2V. Esto, debido a que representan un porcentaje muy importante de los caminos existentes en varios países. Por ejemplo, en México las carreteras tienen una extensión cercana a los 141,000 Km (SCT, 2011); mientras que en EEUU, la extensión de las carreteras representa cerca de un 75% de las millas estatutarias (NHTSA, 2010).

A pesar de las ventajas que ofrecen las VANETs habilitadas a través de las comunicaciones V2V y de que ya fue liberado el estándar para el despliegue de éstas (IEEE 802.11p), aún existen diferentes retos para poder habilitar las aplicaciones previstas para mejorar la seguridad y confort de los pasajeros en los vehículos. Por ejemplo: la privacidad y seguridad de los datos que se comparten; el diseño y aplicación de sistemas automáticos de control de velocidad o estabilidad que aprovechen la información recibida; la disseminación de la información más allá del radio de cobertura de los vehículos, entre otros. De los retos existentes, uno de los más relevantes es el diseño de estrategias que permitan disseminar la información más allá del radio de cobertura del vehículo para que las aplicaciones tengan un mayor impacto en la seguridad y el confort de los tripulantes de un vehículo. Para lograr esto, es necesario que los mensajes transmitidos puedan utilizar a los vehículos ubicados entre la fuente y el destino como retransmisores. Por sencilla que parezca esta idea, la retransmisión de los mensajes por otros vehículos no es una tarea trivial. Principalmente, por la dinámica en la movilidad que presentan. Adicionalmente, debido a que pueden existir escenarios muy densos en las VANETs, si se pidiera a todos los vehículos que escuchan un mensaje la retransmisión del mismo, entonces el medio de transmisión se inundaría y la red se congestionará rápidamente quedando inutilizable. Una mejor estrategia sería solo permitir la retransmisión del mensaje por aquellos vehículos que lo acerquen al destinatario final. Sin embargo, elegir un vehículo cerca de la frontera del radio de cobertura nominal puede ocasionar la pérdida del mensaje o un mayor número de retransmisiones. Por esto, es necesario establecer un conjunto de reglas que definan una "ruta" de retransmisores a utilizar por el mensaje que incremente las posibilidades de ser disseminado desde la fuente hasta el destinatario. A este conjunto de reglas se le conoce como estrategia o protocolo de enrutamiento. El diseño de la estrategia de enrutamiento para comunicaciones vehículo a vehículo (o V2V) es uno de los componentes que representa mayores retos en la implementación de las VANETs. Esto debido a que el protocolo debe de mantener conectividad entre los nodos

evitando usar demasiadas retransmisiones. Así, el diseño de un protocolo de enrutamiento es un elemento clave para el despliegue exitoso de aplicaciones que mejoren la seguridad tanto de los pasajeros como de los propios vehículos. De hecho, el diseño de estrategias de enrutamiento para comunicaciones V2V representa una de las áreas de investigación más importantes en las VANETs y que ha sido estudiada en diversos trabajos, (Bernsen & Manivannan, 2009; Sooksan Panichpapiboon & Pattara-atikom, 2011).

1.1.1 Diseño de algoritmos de enrutamiento en VANETs

Aunque existen diversos enfoques para el diseño de una estrategia de enrutamiento, debido a las características de una VANET (e.g. patrones de movilidad restringidos, alta movilidad, disponibilidad de GPS, etc.) el geográfico es uno de los más utilizados (António Fonseca & Vazão, 2012). Con esto en mente, una estrategia de enrutamiento es básicamente un conjunto de reglas para seleccionar el siguiente salto de un paquete hacia una ubicación geográfica específica. Es decir, el protocolo de enrutamiento no requiere especificar toda la ruta que el paquete seguirá, ya que en cada salto se define el siguiente retransmisor de una manera distribuida. Por lo tanto, para el diseño de una estrategia de enrutamiento basada en posición (enfoque geográfico) es fundamental determinar los factores que afectan la topología de red de un vehículo en particular.

En las VANETs existen dos factores principales que afectan la topología de red tomando como referencia un nodo en particular que desee transmitir información: la movilidad de los vehículos (patrón de movimiento) y el canal radio. El primero depende del escenario de aplicación, urbano o carretera, (Rezende, Boukerche, Pazzi, Rocha, & Loureiro, 2011) debido a que cada escenario presenta diferentes características de velocidad, densidades de flujo vehicular, intersecciones, etc. El patrón de movimiento afecta la topología de la red debido a que la duración del conjunto de enlaces disponibles depende de que tan rápido se muevan los

vehículos vecinos y de la probabilidad de que un nodo abandone súbitamente el vecindario. En los protocolos basados en posición, la fuente o un retransmisor intermedio eligen el siguiente salto del paquete antes de reenviarlo. Este salto comúnmente es elegido basado en la última ubicación de los vecinos. Por lo tanto, debido a la movilidad, el retransmisor elegido puede haber abandonado el radio de cobertura en el momento en el que le es enviado el paquete. Este es un problema importante que debe de ser resuelto por el protocolo de enrutamiento utilizado. Sin embargo, la solución particular implementada dependerá del escenario de aplicación, ya que los patrones de movilidad presentes en zonas urbanas son muy diferentes de los observados en carreteras (António Fonseca & Vazão, 2012; Rezende et al., 2011). Así, el escenario donde la VANET será desplegada (urbano o carretera) juega un rol preponderante en la conformación del vecindario de un vehículo en particular, lo cual debería ser considerado en el diseño de la estrategia de enrutamiento con el fin de obtener el mejor desempeño posible.

El segundo factor que afecta la topología de red de un nodo es el canal radio. El medio inalámbrico presenta diversos retos para la transmisión de las señales debido a diferentes aspectos como las pérdidas por propagación y/o los desvanecimientos lentos y rápidos (Rappaport, 2002). Estos factores pueden modificar de manera dinámica el rango de transmisión de un transceptor de radio. Debido a esto, bajo las condiciones de propagación presentes en escenarios vehiculares reales la cantidad de enlaces disponibles para un vehículo puede variar de forma importante, esto comparado con escenarios donde se considera un radio de cobertura determinista. Considerar un rango de transmisión determinista puede ocasionar problemas severos en el desempeño de un protocolo de enrutamiento cuando este es evaluado bajo condiciones de propagación realistas. Por ejemplo, el protocolo de enrutamiento puede elegir como retransmisor un vecino que este dentro del radio nominal de cobertura, sin embargo, debido a la presencia de obstáculos (e.g. otro vehículos) este vecino podría estar fuera del alcance real del transceptor de radio. Esto, puede ocasionar

desde un mayor retardo (debido a la necesidad de retransmitir el paquete) hasta la pérdida definitiva de éste.

Finalmente, aunque no modifica la topología de red, otro aspecto de suma importancia que se debe considerar cuando se diseña un protocolo de enrutamiento es el tipo de información que el protocolo debe diseminar. Es decir, si el destino de la información es un solo vehículo (*unicast*) o todos los vehículos dentro de una zona relevante (*broadcast*). Desde de la perspectiva del transceptor de radio una transmisión de paquetes *broadcast* es interpretada de igual manera que una transmisión *unicast*. Sin embargo, en la capa de acceso al medio (MAC) y de red existen notables diferencias que deben ser consideradas.

1.2 Planteamiento del problema

Como se planteó en la sección anterior, las carreteras son uno de los escenarios más importantes para las redes vehiculares debido al porcentaje de vías de comunicación terrestre que representan en varios países. Adicionalmente, debido a la poca o incluso nula infraestructura desplegada en este tipo de escenarios, las carreteras presentan grandes retos para las estrategias de enrutamiento enfocadas a comunicaciones V2V. Específicamente, la movilidad de los vehículos y las condiciones de propagación son los dos principales elementos que afectan la topología de red en las comunicaciones V2V, y por lo tanto, el desempeño de los protocolos de enrutamiento enfocados a escenarios tipo carretera.

Tanto la movilidad de los vehículos como las condiciones de propagación presentes en escenarios vehiculares han sido recientemente abordadas en diferentes trabajos de investigación con el propósito de modelar su comportamiento, (Cheng, Henty, Bai, & Stancil, 2008; Harri, Filali, & Bonnet, 2009; Karedal, Czink, Paier, Tufvesson, & Molisch, 2011; Martin Treiber, Hennecke, & Helbing, 2000). Además, en diversos trabajos se ha estudiado el impacto de estas características en las VANETs. Por ejemplo, en el estudio introducido por (Rezende et al., 2011), se establece que la movilidad de los vehículos juega un rol

importante en la estabilidad de la topología de las redes vehiculares ad-hoc. Además, en el trabajo presentado en (Gozalvez, Sepulcre, & Bauza, 2010a) se muestra que el desempeño de un protocolo de enrutamiento depende en gran medida de las condiciones de propagación bajo las que sea evaluado. De esto, se puede inferir que es sumamente importante considerar ambos elementos en el diseño del protocolo de enrutamiento. Sin embargo, aunque algunos protocolos consideran los efectos de la movilidad en su diseño, la mayoría de estos omiten los efectos del canal radio.

La disponibilidad de los sistemas de navegación permite obtener y compartir la información como la posición, velocidad y dirección del vehículo de una manera sencilla. Intercambiar esta información periódicamente podría permitir a cada nodo tener una “fotografía instantánea” de los vecinos con que potencialmente existe un enlace. Con esta información, cada nodo podría tomar una mejor decisión al seleccionar el siguiente salto (retransmisor) del paquete hacia su destino. Por esta razón, para el diseño de un protocolo de enrutamiento, el enfoque geográfico es uno de los que mejor se adapta a la dinámica de las redes vehiculares. Una de las técnicas más comunes para reenviar un paquete es seleccionar como siguiente salto al vehículo que provea mayor avance en dirección al destino. De hecho, esta técnica es ampliamente utilizada en diferentes algoritmos de enrutamiento tanto para escenarios urbanos (Jerbi, Senouci, Rasheed, & Ghamri-Doudane, 2009) como escenarios tipo carretera (Naumov & Gross, 2007). Sin embargo, esta perspectiva simplista presenta dos problemáticas importantes, no considera ni la movilidad de los vehículos ni los efectos del canal radio para la selección del siguiente salto. En algunas propuestas se aborda el problema de la movilidad; como en (Rao, Pai, Boussedjra, & Mouzna, 2008a) donde se introduce un tiempo de vida para cada enlace almacenado en la tabla de vecinos. Una propuesta diferente es presentada en (Sahu, Wu, Sahoo, & Gerla, 2010), donde se utiliza un algoritmo basado en la velocidad y aceleración para actualizar localmente la información de la tabla de vecinos. Con respecto a los protocolos que no

consideran la movilidad de los vehículos en su diseño, los protocolos introducidos en (Rao et al., 2008a, p. -; Sahu et al., 2010) muestran una mejora significativa en métricas como la tasa de entrega de paquetes y el retardo punto a punto. Sin embargo, son evaluadas bajo condiciones de propagación ideales. Por lo tanto, los resultados obtenidos no son concluyentes.

La mayoría de los protocolos de enrutamiento para VANETs considera en su diseño un rango de transmisión determinista. Esto significa que cuando un nodo debe elegir el siguiente salto del paquete hacia su destino, se consideran como potenciales retransmisores a todos los vehículos dentro de su tabla de vecinos, que al momento de la selección, se encuentren dentro del rango de cobertura nominal del transceptor. Dado que estas propuestas son evaluadas en condiciones de propagación ideales, esto parece no tener un efecto negativo en el desempeño del protocolo. Sin embargo, bajo condiciones de propagación realistas, existen diferentes factores que afectan la propagación de la señal de manera importante en un medio inalámbrico. Principalmente el desvanecimiento lento y las pérdidas por propagación (Molisch, Tufvesson, Karedal, & Mecklenbrauker, 2009). Por lo tanto, considerar un rango de transmisión determinista en escenarios vehiculares puede ocasionar una selección errónea del siguiente salto. Esto puede ocasionar desde un mayor número de retransmisiones, que incrementan el retardo de entrega del paquete y la sobrecarga introducida; hasta la pérdida definitiva del paquete, afectando significativamente la tasa de entrega de paquetes. Aún más, debido a que en las redes vehiculares ad-hoc un paquete puede necesitar varios saltos para llegar a su destino, realizar estas selecciones erróneas a lo largo de la ruta del mismo puede disminuir significativamente el desempeño de la red. Así, introducir los efectos del canal radio en el diseño del algoritmo de enrutamiento permitiría una mejor selección del próximo retransmisor, lo que redundaría en diferentes beneficios como:

- Una mayor tasa de entrega de paquetes

- Un menor retardo en la disseminación del paquete
- Una menor sobrecarga de control

Es importante resaltar que la caracterización del canal radio en entornos vehiculares es un área que ha sido ampliamente estudiada (Mecklenbrauker et al., 2011; Molisch et al., 2009). Además, en diversos trabajos se ha establecido la importancia de los efectos del canal radio sobre los protocolos de enrutamiento (Gozalvez et al., 2010a; Lee, Lee, & Gerla, 2009a). No obstante, y a pesar que el diseño de protocolos de enrutamiento para las redes vehiculares es un área de investigación que se ha abordado en una diversa gama de trabajos (Bernsen & Manivannan, 2009; Sooksan Panichpapiboon & Pattara-atikom, 2011), los resultados obtenidos en la caracterización del canal radio para escenarios vehiculares tipo carretera no han permeado al diseño de los protocolos de enrutamiento enfocados a este tipo de entornos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo de este trabajo de investigación es estudiar los efectos del canal radio y la movilidad en el diseño de estrategias de enrutamiento enfocadas a comunicaciones V2V en escenarios tipo carretera. Esto, con el fin de proponer estrategias de enrutamiento que mejoren las prestaciones ofrecidas por protocolos de enrutamiento previamente propuestos para redes vehiculares.

1.2.2 Objetivos específicos

Con el propósito de alcanzar el objetivo planteado se definen los siguientes objetivos específicos:

- Diseño de un protocolo de enrutamiento *unicast* enfocado a escenarios tipo carretera que considere los aspectos de movilidad y los efectos del canal sobre la elección del siguiente salto para mejorar su desempeño.

- Diseño de un algoritmo de enrutamiento *broadcast* enfocado a escenarios tipo carretera que considere los aspectos de movilidad y los efectos del canal sobre la elección del siguiente salto para mejorar su desempeño.
- Evaluación y comparación de desempeño de los protocolos propuestos bajo condiciones realistas considerando la utilización de transceptores IEEE 802.11p.

1.3 Metodología

La metodología seguida en este trabajo se describe a continuación:

- investigación del estado del arte del estudio de la movilidad y condiciones de propagación en escenarios tipo carretera con la finalidad de implementar una cama de pruebas que refleje las condiciones presentes en escenarios vehiculares tipo carretera.
- Revisión de la literatura de los protocolos de enrutamiento enfocados a las VANETs, tanto *unicast* como *broadcast*, para posteriormente elegir los protocolos más sobresalientes en cada área y evaluarlos bajo las condiciones presentes en los escenarios tipo carretera. Esto, con el propósito de detectar las áreas de oportunidad en el diseño de protocolos de enrutamiento para VANETs.
- Considerando las áreas de oportunidad encontradas, se realizó el diseño inicial de la estrategia de enrutamiento y se evaluó en las mismas condiciones que los otros protocolos para comparar su desempeño.
- Con las observaciones realizadas, se hicieron ajustes a la estrategia inicial para incluirlas en el diseño de la propuesta final.
- Los protocolos diseñados se evaluaron bajo condiciones presentes en escenarios tipo carretera para comparar su desempeño con el de los protocolos líderes.
- De la evaluación de las métricas obtenidas para cada uno, se obtuvieron los resultados que se presentan en los capítulos correspondientes de este

trabajo. Un esquema de la metodología descrita puede ser observado en la Figura 2 .

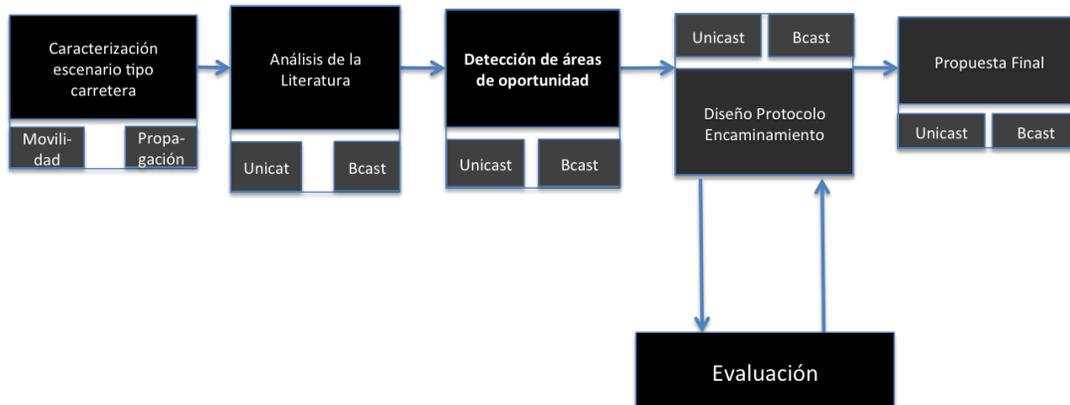


Figura 2. Esquema de la metodología de la tesis

1.5 Organización de la tesis

El capítulo 2 presenta los detalles de las VANETs y los escenarios donde son desplegadas.

El capítulo 3 presenta una discusión sobre el estado del arte de los protocolos de enrutamiento *unicast* para determinar los elementos necesarios en el diseño y evaluación; adicionalmente, también se presenta en este capítulo una argumentación basado en la revisión del estado del arte de los algoritmos de difusión *broadcast* sobre los aspectos importantes para el diseño y evaluación de estos.

El capítulo 4 presenta el diseño de los módulos de un protocolo de enrutamiento *unicast* enfocado a escenarios tipo carretera.

En el capítulo 5 se presentan los resultados de la evaluación realizada para el algoritmo de enrutamiento *unicast*.

El capítulo 6 presenta la evaluación de la estrategia de difusión *broadcast* propuesta en este trabajo que incluye un mecanismo adaptativo de paquetes de información topológica.

Las conclusiones respecto al diseño de protocolos de enrutamiento en escenarios vehiculares tipo carretera y trabajo futuro son puntualizadas en el capítulo 7.

Finalmente, se enlistan las referencias bibliográficas utilizadas para dar sustento al presente trabajo.

1.6 Contribuciones del trabajo de tesis.

Dentro de las contribuciones más importantes de este trabajo se encuentran las siguientes:

- A través de los resultados obtenidos para los dos protocolos propuestos en este trabajo de tesis, FPBR y DBMA-PA, se demostró que considerar los efectos del canal radio al seleccionar el siguiente salto permite implementar protocolos que se adaptan a las condiciones presentes en escenarios vehiculares tipo carretera.
- Se diseñó un nuevo algoritmo de selección del siguiente salto llamado MFWAR considerando los efectos del canal radio. La evaluación de este mecanismo muestra que puede reducir de manera significativa las retransmisiones necesarias y por lo tanto, el retardo y la sobrecarga del protocolo de enrutamiento.
- Se diseñó un nuevo protocolo de enrutamiento *unicast* llamado FPBR enfocado a escenarios tipo carretera y basado en el mecanismo MFWAR. Las tasa de entrega de paquetes, el retardo punto a punto y las demás métricas obtenidas para FPBR muestran que aún bajo las difíciles condiciones de movilidad y propagación presentes en escenarios tipo carretera, FPBR tiene un desempeño sobresaliente.

- Se diseñó un nuevo mecanismo para adaptar la frecuencia de envío de paquetes de información topológica basado en la velocidad y la densidad del vehículo. Este mecanismo, fue integrado y evaluado en el contexto de un protocolo de enrutamiento *broadcast*. La alta tasa de diseminación de paquetes obtenida por DBMA-PA muestra que el mecanismo de PITs adaptativo no tiene un efecto negativo en ésta. Además, tiene la ventaja de que la sobrecarga generada se disminuye con respecto a cuándo se utiliza una frecuencia de envío fija.
- Se adaptó el mecanismo MFWAR para implementarlo como una nueva técnica de supresión de *broadcast* (TSB). Basándose en esta TSB y el mecanismo de PITs adaptativo, se diseñó y evaluó un nuevo algoritmo de enrutamiento *broadcast* llamado DBMA-PA. La tasa de diseminación de paquetes, la sobrecarga generada y el retardo obtenido para DBMA-PA muestran que la TSB logra entregar los paquetes a la mayor parte de los vehículos dentro de la zona de relevancia. Esto, con un número menor de paquetes de control con respecto al protocolo de referencia.

Derivado de este trabajo de tesis se publicó un artículo en revista que a continuación se cita:

Nombre de la publicación: *Reliable Freestanding Position-Based Routing in Highway Scenarios*

Nombre de la revista: *Sensors* reconocida por Science Citation Index

Editorial: MDPI

Fecha de aceptación: 15 de octubre de 2012

Fecha de publicación: 24 octubre de 2012

Aportación: En este trabajo se presenta una estrategia de enrutamiento *unicast* que considera los efectos del canal radio sobre la propagación de la señal. Este protocolo es evaluado en condiciones propias de las VANETs desplegadas en carreteras. En este escenario, la estrategia propuesta muestra mejores métricas de desempeño que las propuestas de referencias.

Capítulo 2

Redes vehiculares ad-hoc

Las aplicaciones previstas para las redes vehiculares (e.g. aviso de cambio de carril) requieren que exista la posibilidad de compartir información en cualquier escenario. Aunque las redes basadas en infraestructura actualmente permiten a los conductores de vehículos compartir información, desplegar infraestructura a lo largo de toda la red carretera de un país representa un obstáculo debido al costo que se debe pagar y el beneficio que el operador puede obtener. Adicionalmente, las aplicaciones para VANETs regularmente requieren el intercambio de paquetes de información topológica a través de un mecanismo periódico. Este mecanismo puede agotar rápidamente los recursos de una red con infraestructura, como la celular (Vinel, 2012). Debido a esto, las VANETs son la opción más viable para el mejoramiento de la seguridad y confort de los pasajeros de los vehículos en diferentes escenarios.

En este capítulo se da una descripción general de las redes vehiculares ad-hoc (VANETs), introduciendo las características principales que posee este tipo de redes así como los principales retos que se presentan en la implementación de una VANET. En primer plano se contextualiza la posición que ocupan las VANETs entre las redes de datos en general para después examinar escenarios de aplicación específicos y los elementos más importantes que son necesarios para un protocolo de enrutamiento en este tipo de escenarios pueda ser capaz de proveer soporte a las aplicaciones de seguridad y confort.

2.1 Redes móviles ad-hoc

Actualmente, los dispositivos de cómputo móvil como celulares, tabletas y laptops capaces de establecer comunicaciones inalámbricas se han vuelto muy populares. Con esto, se ha visto una gran explosión en la demanda de conectividad entre

todo tipo de dispositivos para el acceso a diferentes servicios en cualquier lugar y hora. Muchos de estos servicios no necesariamente buscan o necesitan contar con acceso a la Internet, ya que existen diversas aplicaciones que se pueden beneficiar con el intercambio de información de manera inalámbrica. Por ejemplo, el intercambio de información entre equipos industriales, el intercambio de archivos, etc.

Es en este contexto que surgen las redes móviles ad-hoc (MANETs), que pueden ser definidas brevemente como redes de datos auto-configurables entre dispositivos móviles inalámbricos, donde las tareas de establecimiento y mantenimiento de la red son llevadas a cabo de manera distribuida. La comunicación entre nodos de una MANET puede llevarse a cabo solo entre dispositivos que están al alcance del transceptor de radio uno de otro. Cuando un nodo requiere establecer comunicación con un dispositivo más allá del alcance de su transceptor de radio entonces debe utilizar los nodos intermedios, a través de un protocolo de enrutamiento, para lograrlo. Aunque para establecer un enlace con un dispositivo lejano en las redes confinadas o las redes con infraestructura también puede ser necesario utilizar un protocolo de enrutamiento (ver Figura 3(a)); las MANETs representan un escenario con mayores y más diversas problemáticas, esto, debido a la dinámica de su topología (Ver Figura 3(b)).

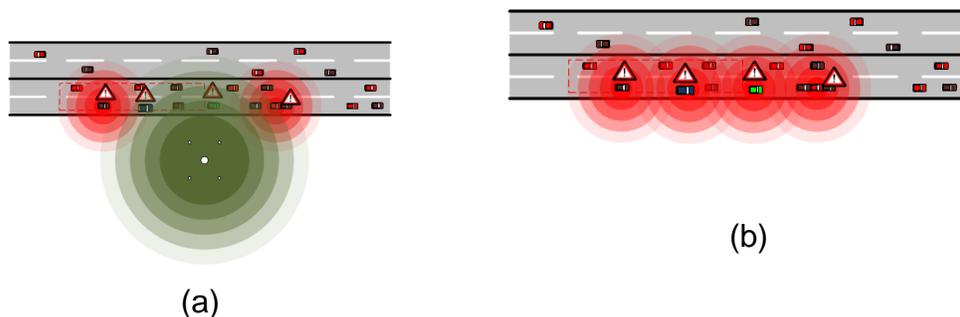


Figura 3.- Transmisión de un mensaje en (a) una red con infraestructura; (b) una red ad-hoc

2.2 VANETS

Las redes vehiculares ad-hoc (VANETs por sus siglas en inglés) pueden clasificarse como parte de las redes móviles ad-hoc (MANETs), sin embargo, poseen características especiales que las diferencian de manera importante (Radu Popescu-Zeletin, 2010; Sichitiu & Kihl, 2008). Por ejemplo, la velocidad de los nodos en las redes vehiculares puede ser mucho mayor que la de los integrantes de una MANET. Otra diferencia importante es el patrón de movimiento; mientras un vehículo está sujeto a las normas de tránsito y la geometría de las vialidades, un nodo en una MANET puede moverse de manera aleatoria por un área determinada. Estas diferencias impactan en la estabilidad de la topología de la red, es decir en la cantidad y duración de los enlaces de un nodo hacia sus vecinos (Sichitiu & Kihl, 2008). Por lo tanto, las estrategias de enrutamiento propuestas para MANETs, no son aplicables directamente en escenarios vehiculares. De hecho, aún no existe un protocolo de enrutamiento estándar, incluso alguno de que funja como estándar de facto, como es el caso de AODV en las MANETs. Aunque se han propuesto diversos protocolos de enrutamiento para las redes móviles ad-hoc (David B. Johnson & David A. Maltz, 1996; Karp & Kung, 2000; Perkins & Royer, 1999), estos no son directamente aplicables a las redes vehiculares ad-hoc debido a las características específicas de las VANETs (Bernsen & Manivannan, 2009; Chaurasia, Tomar, Verma, & Tomar, 2012).

2.3 Aspectos relevantes de la propagación en un canal inalámbrico

En el proceso de transmisión-recepción en un sistema de comunicaciones inalámbrico la señal puede propagarse desde el transmisor hasta el receptor a través de diferentes caminos llamados componentes multi-camino o MPC por sus siglas en inglés. Cada MPC es un “eco” de la señal transmitida que puede arribar al receptor con una diferente fase, amplitud y/o tiempo que la señal original. La cantidad de MPCs y las características de los mismos dependen del escenario donde se lleve a cabo la comunicación, esto debido a que son resultado de

diferentes fenómenos físicos como la difracción, reflexión y dispersión (Rappaport, 2002), las cuales dependen de las condiciones de medio de propagación. Los efectos de estos fenómenos sobre la señal recibida pueden ser modelados a través de la respuesta al impulso del canal, la cual varía en el tiempo debido al movimiento de los obstáculos o de los nodos involucrados en la transmisión (Molisch et al., 2009). Es decir, para modelar completamente el canal inalámbrico es necesaria una respuesta al impulso variante en el tiempo. Sin embargo, trabajar directamente con una serie de respuestas al impulso puede representar demasiada carga (Molisch et al., 2009). Por lo tanto, comúnmente se trabaja con una serie de estadísticas del canal que representan de manera más compacta el comportamiento del mismo, como las pérdidas por propagación, el desvanecimiento, la dispersión doppler y la dispersión por retardo. En las siguientes subsecciones se describe con más detalle como estos parámetros modelan los efectos del canal sobre la señal transmitida.

2.3.1 Pérdidas por propagación

Las pérdidas por propagación (PP) representan la atenuación promedio de la señal conforme ésta se propaga, comúnmente esta atenuación es modelada en función de la distancia d . De hecho, en varios experimentos se ha encontrado que estas pérdidas se incrementan de forma exponencial d^n , donde n es llamado el exponente de PP. Es importante mencionar que las PP son consideradas como el parámetro más importante en cualquier canal inalámbrico (Karedal et al., 2011; Molisch et al., 2009).

2.3.2 Estadísticas de desvanecimientos

Las estadísticas de desvanecimientos (ED) son utilizadas para describir las fluctuaciones de la potencia recibida. Se pueden diferenciar básicamente dos tipos de desvanecimientos, los desvanecimientos rápidos (o de pequeña escala) y los desvanecimientos de gran escala o *shadowing* (Rappaport, 2002). Los desvanecimientos rápidos se producen durante el movimiento en distancias cortas

(aproximadamente una longitud de onda) y son ocasionados por la interferencia entre diferentes MPCs recibidos. Por otro lado, el *shadowing* es causado por los obstáculos que rodean al transmisor y al receptor, y representa la variación de potencia recibida a una gran distancia con referencia a longitud de onda (Molisch et al., 2009; Rappaport, 2002).

2.3.3 Perfil de retardo de potencia

El perfil de retardo de potencia (PRP) cuantifica la potencia recibida debido a las diferentes MPCs entre un tiempo τ retardo $\tau + d\tau$. Es importante mencionar la importancia del PRP, pues a través de su caracterización se pueden determinar parámetros importantes como la longitud del prefijo cíclico en un sistema OFDM (Molisch et al., 2009).

2.3.4 Espectro doppler

Cuando alguno, o ambos, de los nodos involucrados en una transmisión inalámbrica están en movimiento, la señal transmitida puede sufrir un corrimiento en frecuencia conocido como el efecto doppler. En un sistema de comunicación inalámbrico, cada MPC puede experimentar un corrimiento en frecuencia distinto, la cual es modelada por el espectro doppler (DS)) (Molisch et al., 2009).

De acuerdo a (Mecklenbrauker et al., 2011), las siguientes observaciones pueden hacerse en canales vehículo a vehículo (V2V) respecto a los parámetros anteriores. Primero, como consecuencia de las pérdidas por propagación y el desvanecimiento, el radio de cobertura no corresponde a una forma circular alrededor del transmisor, sino a una forma mucho más compleja, variante en el tiempo y que incluso puede ser no contigua. Además, debido a las altas velocidades presentes en las comunicaciones V2V, el canal muestra una variabilidad importante. Específicamente, esta variabilidad es mucho más significativa en vehículos que se acercan el uno al otro, mientras que muestra un efecto menor en vehículos avanzando en convoy.

Desde el punto de vista de la capa física, se implementan contramedidas con el objetivo de contrarrestar los efectos del canal inalámbrico. Sin embargo, debido a las difíciles condiciones del canal inalámbrico, exacerbadas por las particularidades de las comunicaciones vehiculares (altura de las antenas, altas velocidades, etc.); las contramedidas implementadas en la capa física no resuelven completamente los efectos mencionados anteriormente. Es decir, el radio de cobertura sigue siendo una forma más complicada que un simple círculo y varía dependiendo del tiempo y de las condiciones del escenario. Por lo tanto, no se debe asumir que cada transmisión será exitosa hasta el borde del área de cobertura.

A pesar de que el radio de cobertura no puede considerarse como un valor determinístico, desde la perspectiva de los protocolos de red para VANETs este hecho es comúnmente obviado (ver sección 3.1.3). En el trabajo de tesis no se consideran contramedidas para contrarrestar los efectos del canal sobre la transmisión de una señal, pero si se consideran medidas para reducir las pérdidas ocasionadas debido al rango de transmisión dinámico, mejorando el desempeño del protocolo como se muestra en la sección de resultados. Estas medidas son llevadas a cabo a través del mecanismo de selección del siguiente salto llamado MFWAR presentado en la sección 4.1.

2.4 Escenarios de despliegue

Uno de los principales elementos que se debe tomar en cuenta para la implementación de una VANET es la dinámica de la topología que presenta este tipo de redes. Como se mencionó, esta dinámica depende del tipo de escenario donde se desplazan los vehículos, i.e. urbano o carretera. Aún más, el escenario de despliegue no solo impacta la topología de la fuente, también determina la

topología a lo largo de toda la ruta entre la fuente y el destino. Esto, a través de aspectos como el patrón de movilidad, la disponibilidad de infraestructura, la cantidad de obstáculos y las condiciones de propagación de la señal a través del canal radio (António Fonseca & Vazão, 2012; Karedal et al., 2011; Muñoz et al., 2012).

Dentro de un escenario urbano la cantidad de obstáculos que pueden modificar el flujo de un vehículo (e.g. semáforos, peatones, vehículos pesados) es mucho mayor que los que pueden ser encontrados por un vehículo en una carretera. Adicionalmente, la máxima velocidad de un automóvil es considerablemente más alta en una carretera que en la ciudad (Rezende et al., 2011). Respecto al canal radio, cada escenario representa retos distintos, mientras que la interferencia de los edificios y de otras fuentes es un aspecto importante en los escenarios urbanos, las altas velocidades en las carreteras y la obstrucción del suelo por largos periodos, debido a la división de concreto por ejemplo, son aspectos que impactan en la propagación de una señal (Karedal et al., 2011). Debido a la alta concentración de población en una zona urbana, es común encontrar redes de infraestructura como la red celular o redes de área personal para el acceso a internet. Por otro lado, en un escenario tipo carretera, la interferencia causada por estas fuentes es menor, debido a que la cantidad que existente es muy poca o incluso nula.

Debido a las marcadas diferencias entre un escenario tipo urbano y uno tipo carretera (ver Tabla 2), es posible que una VANET diseñada para un tipo de escenario no pueda funcionar adecuadamente en otro, por ejemplo, el protocolo de enrutamiento diseñado para escenarios tipo carretera puede no manejar adecuadamente las altas velocidades presentes en un escenario tipo carretera. En este contexto, es importante remarcar la relevancia de los escenarios tipo carretera que constituyen una gran parte de la infraestructura de caminos en varios países. Como se mencionó en la introducción, tan solo en México, existe una infraestructura carretera que tiene una extensión cercana a los 141,000 Km

(SCT, 2011) o en EEUU donde las carretas representan un alto porcentaje de los caminos disponibles (NHTSA,2010). Es importante mencionar que para desplegar una infraestructura que habilite servicios capaces de mejorar la seguridad y confort de los pasajeros de los vehículos a lo largo de toda la red de carreteras de un país se requiere de tiempo y una gran inversión económica. Por lo tanto, las comunicaciones vehiculares V2V cobran relevancia en este tipo de escenarios. De hecho, las comunicaciones V2V a través de un estudio realizado por la NHTSA las comunicaciones V2V han sido identificadas como una contramedida activa capaz de solventar potencialmente cerca del 79% de los escenarios pre-colisión que involucran a conductores en condiciones normales (e.g. sin efectos del alcohol o drogas). Por lo tanto las comunicaciones V2V enfocadas a escenarios tipo carretera es un área de investigación muy relevante como se muestra en los trabajos realizados en las siguientes referencias (Abdel Hafeez, Zhao, Liao, & Ma, 2011; Baccelli, Jacquet, Mans, & Rodolakis, 2012; Cheng et al., 2008; Chu & Huang, 2012; Antnio Fonseca & Vazao, 2012a; Rawashdeh & Mahmud, 2012; Sahu et al., 2010; Yan, Jiang, Shen, Chang, & Huang, 2012).

Tabla 2. Características de los escenarios vehiculares por tipo, i.e. carretera y urbano adaptada de (António Fonseca & Vazão, 2012).

Grupo	Propiedad	Urbano	Carretera
Escenario	Obstáculos	Muchos	Algunos
Patrón de Movilidad	Cantidad de opciones	Muchos	Algunos
Propiedades de Movilidad	Velocidad	Bajo	Alta
	Variación de la velocidad	Alta	Baja
	Densidad de nodos	Muy Alta - Muy baja	Alta - Baja
Infraestructura	Vehículo-Carretera	Alta	Baja
Propagación de la señal	Interferencia de otras fuentes	Alta	Baja
	Interferencia obstáculos	Alta	Baja

2.4.1 Características del escenario de carreteras

2.4.1.1 Propagación

Debido a su naturaleza, las características del medio de propagación inalámbrico pueden afectar negativamente la propagación de una señal. En este contexto, las pérdidas por propagación y el desvanecimiento son las características más importantes que se deben considerar cuando se analiza el desempeño de un sistema de comunicaciones V2V (Karedal et al., 2011; Mecklenbrauker et al., 2011; Molisch et al., 2009). La mayor parte de los trabajos de investigación enfocada a los protocolos de enrutamiento para las VANETs, asume que el canal radio se comporta de acuerdo a los modelos de propagación tradicionales, e.g. espacio libre, dos rayos, Nakagami, etc. Sin embargo, como se establece en (Karedal et al., 2011) estos modelos no son los que mejor se adecuan a las condiciones existentes en las comunicaciones V2V. Esto, debido a que la altura de las antenas y la dirección de los vehículos tienen efectos importantes sobre la propagación de la señal (Gozalvez et al., 2010a; Karedal et al., 2011; Mecklenbrauker et al., 2011; Molisch et al., 2009).

Actualmente, se pueden encontrar en la literatura varios modelos de propagación para comunicaciones V2V en carretera que han sido propuestos, por ejemplo (Acosta-Marum & Ingram, 2007a; Cheng et al., 2008; Karedal et al., 2011; Kunisch & Pamp, 2008; Paier et al., 2009) y las referencias dentro de (Mecklenbrauker et al., 2011; Molisch et al., 2009). De los trabajos que se mencionan, (Cheng et al., 2008; Karedal et al., 2011; Kunisch & Pamp, 2008; Paier et al., 2009) presentan modelos de propagación enfocados a escenarios tipo carretera. En (Acosta-Marum & Ingram, 2007a) se presentan dos modelos de desvanecimiento rápido para dos diferentes casos de comunicaciones V2V en escenarios tipo carretera: vehículos acercándose y vehículos viajando en la misma dirección a la misma velocidad. Estos modelos, fueron utilizados previamente para la evaluación del estándar IEEE 802.11p, (Fernández-Caramés et al., 2011a). Sin embargo, estos

modelos no son aplicables directamente a la evaluación y diseño de los protocolos de enrutamiento para VANETs en escenarios tipo carretera. Esto, debido a que las pérdidas por propagación y el desvanecimiento lento (o *shadowing*) no son consideradas en los modelos presentados en (Acosta-Marum & Ingram, 2007a). Como se mencionó, las pérdidas por propagación son un parámetro crítico que debe ser considerado cuando se evalúan los protocolos de enrutamiento para VANETs. Esto, debido a que la relación señal a ruido (SNR) de la señal recibida en cada vehículo depende de las pérdidas por propagación. Aún más, en (Acosta-Marum & Ingram, 2007a) no se provee una ecuación para modelar la propagación de la señal cuando los vehículos se alejan uno de otro en un escenario tipo carretera, el cual es un caso común (Karedal et al., 2011). De los trabajos encontrados en la revisión de la literatura, sobresale el modelo presentado en (Karedal et al., 2011). Esto, debido a que es derivado de una campaña de medición V2V exhaustiva. Es importante mencionar que los resultados obtenidos en ese trabajo son compatibles con los resultados reportados en (Kunisch & Pamp, 2008). La ecuación que modela la propagación de la señal introducida en (Karedal et al., 2011), está basada en una ley de potencia clásica e incluye los efectos del desvanecimiento lento (*shadowing*) en uno de sus términos. Una característica muy importante en este modelo es que permite la caracterización de tres diferentes casos de comunicación presentes en las comunicaciones V2V en escenarios tipo carretera con la misma ecuación. Esto es, vehículos viajando en dirección opuesta y que se acercan, vehículos viajando en convoy y vehículos viajando en dirección opuesta y que se alejan uno de otro. Por lo anterior, este modelo es considerado para integrar la cama de pruebas para la evaluación de los protocolos propuestos. La Ecuación (1) corresponde al modelo de propagación introducido en (Karedal et al., 2011).

$$PL(d) = PL_0 + 10n \log_{10} \left(\frac{d_{(Tx,Rx)}}{d_0} \right) + X_\sigma + \zeta PL_c \quad d_{(Tx,Rx)} > d_0 \quad (1)$$

Donde $d_{(T_x, R_x)}$ es la distancia de propagación ($T_x - R_x$); d_0 es la distancia de referencia; PL_0 son las pérdidas por propagación a la distancia de referencia d_0 ; n es el exponente de pérdidas por propagación; X_σ es una variable con distribución normal, media cero y una desviación estándar σ ; PL_c es un término de corrección para considerar la diferencia en las pérdidas por propagación entre dos vehículos que se acercan y dos vehículos que se separan; ζ es una variable definida de acuerdo a la dirección relativa de los vehículos. Esto es, ζ adquiere el valor de 1 para vehículos viajando en direcciones opuestas y alejándose; -1 para vehículos viajando en direcciones opuestas y acercándose; y 0 para vehículos viajando en convoy. Los valores que no se mencionan pueden ser encontrados en (Karedal et al., 2011).

2.4.1.2 Movilidad

Cuando se realiza la evaluación de un protocolo de enrutamiento diseñado para VANETs, es sumamente importante tomar en cuenta la movilidad del tráfico vehicular (F. Li & Wang, 2007; Vinayakray-Jani & Sanyal, 2012). Sin embargo, entre mayor realismo provea el modelo de movilidad, la carga computacional será también mayor. En este contexto, es importante mencionar que elegir el modelo de movilidad adecuado para evaluar un protocolo depende significativamente de los requerimientos de la aplicación (Harri et al., 2009). Es decir, cuanto debe interactuar el modelo de movilidad con la aplicación

Los modelos de movilidad pueden ser clasificados en dos grandes grupos, los que representan características macroscópicas como densidad y velocidad promedio; y los que modelan características relacionadas con cada vehículo como velocidad, inter-distancia y el comportamiento humano (Harri et al., 2009). Para la evaluación de un protocolo de enrutamiento, el comportamiento más relevante es el referente a las características microscópicas. Esto, debido a que estas características contribuyen junto con los efectos del canal inalámbrico a definir la topología de red. Es decir, cuales enlaces están disponibles y por cuanto tiempo. Dentro de los

modelos microscópicos, los modelos seguidores o *car following* (CFM por sus siglas en inglés) que involucran el comportamiento humano en los patrones de movilidad son ampliamente aceptados para la evaluación de las VANETs (Khodayari, Ghaffari, Kazemi, & Braunstingl, 2012). En la literatura, existen diversos modelos CFMs propuestos, (Gipps, 1981; Khodayari et al., 2012; Krauss, Wagner, & Gawron, 1997; Nagel & Schreckenberg, 1992; Martin Treiber et al., 2000). Entre estos, el modelo presentado en (Martin Treiber et al., 2000) llamado IDM es uno de los más utilizados por diferentes generadores de tráfico, por ejemplo, (A. Mahajan, N. Potnis, K. Gopalan, & A. Wang, 2006; Baumann, Legendre, & Sommer, 2008; CANU Project Home Page, n.d.; Sven Jaap, Marc Bechler, & Lars Wolf, 2005; VanetMobiSim Project Home Page, n.d.). Este modelo (IDM), caracteriza el movimiento de los vehículos basado en la aceleración instantánea. Esta es una característica importante, debido a que la estabilidad de la topología de la red es dependiente de este parámetro (Abdel Hafeez et al., 2011). Por lo anterior, en este trabajo el patrón de movilidad de cada vehículo en la cama de pruebas sigue el comportamiento modelo a través de IDM, el cual está representado por la aceleración \dot{v}_φ , Ecuación (2) y para el espacio mínimo deseado $s^*(v_\varphi, \Delta v_\varphi)$, Ecuación (3).

$$\dot{v}_\varphi = a_\varphi \left[1 - \left(\frac{v_\varphi}{v_{0\varphi}} \right)^\omega - \left(s^* \frac{(v_\varphi, \Delta v_\varphi)}{s_\varphi} \right)^2 \right] \quad (2)$$

$$s^*(v_\varphi, \Delta v_\varphi) = s_{0\varphi} + T_\varphi v + v_\varphi \frac{\Delta v_\varphi}{2\sqrt{a_\varphi b_\varphi}} \quad (3)$$

Donde v es la velocidad del vehículo φ ; a es la aceleración máxima del vehículo φ ; T es el tiempo en el que un vehículo recorre la mínima distancia segura hacia el vehículo φ ; v_0 es la velocidad máxima del vehículo φ ; b es la desaceleración

confortable del vehículo φ ; s espacio entre el vehículo φ y el vehículo de enfrente; s_0 distancia de bloqueo; ω exponente de aceleración.

2.5 Tipos de aplicaciones

Las VANETs tienen el potencial de habilitar una amplia gama de aplicaciones para mejorar el confort y seguridad de los pasajeros de los vehículos. De acuerdo a (Radu Popescu-Zeletin, 2010), las aplicaciones en VANETs pueden dividirse en:

- Seguridad
- Eficiencia de recursos
- Infotainment y servicios avanzados de asistencia a los conductores

Las aplicaciones de seguridad están enfocadas en incrementar la integridad tanto de los pasajeros de los vehículos como de los mismos vehículos, e.g. asistencia de cambio de carril (Radu Popescu-Zeletin, 2010). Las aplicaciones de eficiencia de recursos están dirigidas a disminuir el impacto económico y ambiental ocasionado por las congestiones de tráfico. Esto, a través de aplicaciones que hagan más eficiente el flujo de tráfico como el sistema de control de tráfico presentado en (Milanes et al., 2012). Finalmente, las aplicaciones de infotainment tienen el objetivo de habilitar aplicaciones que hagan más confortable el viaje de los pasajeros, por ejemplo, conexión a internet (Benslimane, Barghi, & Assi, 2011), transferencias de archivo (Isento et al., 2011), juegos cooperativos (O. K. Tonguz & Boban, 2010). Es importante mencionar que cada una de estas aplicaciones tiene diferentes requerimientos de comunicación. Por ejemplo, la información generada por las aplicaciones de seguridad es de interés general. Por otro lado, las aplicaciones de infotainment (e.g. acceso a internet) requieren la identificación de una entidad en particular para establecer una comunicación uno a uno.

2.6 Mecanismos de enrutamiento

En las VANETs, un protocolo de enrutamiento es un conjunto de reglas enfocadas en elegir el siguiente retransmisor que se considere más apto para entregar los mensajes generados por una aplicación desde la fuente hasta el destino. Como es bien conocido, los estándares para comunicaciones inalámbricas (e.g. WiMAX, IEEE 802.11x) están dedicados a dos tareas muy específicas: establecer las reglas para la formación de un enlace y regular el uso que hacen las estaciones del canal radio. Por lo tanto, cuando un nodo quiere compartir información con algún nodo ubicado más allá de su radio de cobertura, debe hacer uso de los nodos intermedios. Aunque las redes con infraestructura o las redes cableadas también confían en rutas multi-salto para hacer llegar la información a nodos lejanos; las VANETs presentan un reto mucho mayor debido a la alta dinámica presente en este tipo de redes, la cual modifica constantemente el conjunto de enlaces disponibles para un nodo (ver Figura 3).

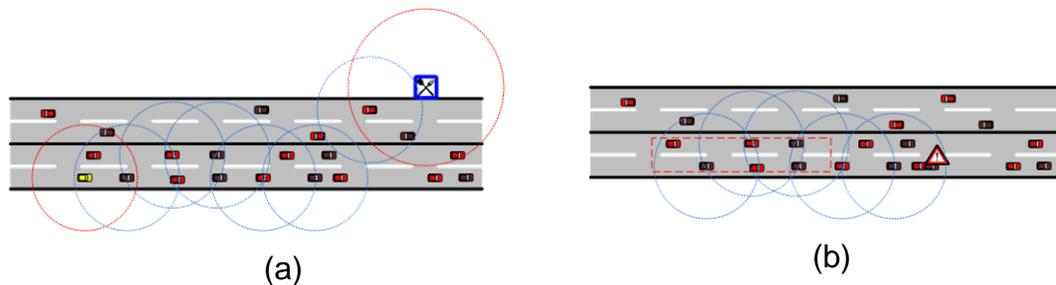


Figura 4. (a) Ejemplo de una comunicación *unicast* en una red V2V; (b) ejemplo de una comunicación *broadcast* en una red V2V.

Las VANETs tiene el potencial de habilitar diferentes tipos de aplicaciones (e.g. seguridad, infotainment). Como se mencionó anteriormente, cada aplicación tiene diferentes requerimientos e implica diferentes retos para el protocolo de enrutamiento (F. Li & Wang, 2007). Mientras que las aplicaciones de seguridad, por ser de interés para todos, requieren en general la disseminación de paquetes tipo *broadcast* (ver Figura 4(b)); las aplicaciones de confort están regularmente dedicadas a la transmisión de paquetes entre una fuente y un destino, es decir

paquetes tipo *unicast* (ver Figura 4(a)). Esto, hace evidente que un aspecto importante a tomar en cuenta cuando se diseña un protocolo de enrutamiento para VANETs es la aplicación para la que será utilizado. Esto es, si la información es dirigida a un nodo en particular (*unicast*); o si es de interés general (*broadcast*).

De lo anterior se puede inferir que en el caso de la información *unicast*, es necesario contar con un servicio que ubique la dirección o posición del destinatario antes de iniciar la transmisión de los datos. Por otro lado, en el caso de la información *broadcast*, dado que es de interés general, no es necesario dicho módulo. Sin embargo, debido a que la información se emite con una frecuencia mayor, es necesaria una técnica de supresión de *broadcast* (TSB) para evitar que el canal se congestione rápidamente y evitar el conocido problema de la tormenta de *broadcast* (Wisitpongphan, N. et al., 2007). Adicional a los aspectos mencionados, existen otros importantes que deben ser considerados. Debido a la relevancia de las estrategias de enrutamiento para este trabajo, estos aspectos son explorados a detalle más adelante en el capítulo 3.

2.7 Tecnologías de comunicación inalámbrica utilizadas en VANETs

Debido al interés de la industria y la academia por el despliegue de las VANETs, se han propuesto diversas tecnologías de capa física y acceso al medio para la habilitación de este tipo de redes. Por ejemplo: WiMAX (Kun Yang, Shumao Ou, Hsiao-Hwa Chen, & Jianghua He, 2007), bluetooth (Sugiura & Dermawan, 2005), IEEE 802.11g (Aquino-Santos, Rangel-Licea, Edwards, & Garcia-Ruiz, 2010), IEEE 802.11b. Entre estas, el estándar IEEE 802.11b se ha utilizado extensivamente como habilitador de la capa física en diversas investigaciones, (Jerbi et al., 2009; Lee et al., 2009a; Sahu et al., 2010).

Como se mencionó la topología presente en las VANETs es altamente dinámica, este hecho sugiere que un mecanismo de control de acceso al medio distribuido como los esquemas IEEE 802.11x, podrían ser más adecuados para un entorno vehicular. Sin embargo, las restricciones impuestas por las VANETs como los

efectos de propagación y la velocidad de los vehículos requieren de una tecnología diferente a los estándares utilizados comúnmente en las redes de área local. Debido a esto, recientemente la IEEE liberó el estándar 802.11p el cual, a diferencia de los otros, esta específicamente diseñado para el acceso inalámbrico en ambientes vehiculares. Por esta razón, esta tecnología se escogió para ser utilizada en la capa física de este trabajo de investigación.

2.8.1 IEEE 802.11p

2.8.1.1 Capa física

Hasta ahora se han propuesto diversas tecnologías para la implementación de las VANETs tales como: WiMAX (Fernández-Caramés, González-López, & Castedo, 2011b), bluetooth (Pasolini & Verdone, 2002; Sugiura & Dermawan, 2005) e IEEE 802.11b (Inoue, Nakata, Itami, & Itoh, 2004; Mizutani & Kohno, 2001). Sin embargo, debido a la relevancia de las VANETs, el Instituto de Ingenieros en Electricidad y Electrónica (IEEE por sus siglas en inglés) desarrollo el estándar IEEE 802.11p liberado en 2012 (IEEE, 2010a) enfocado a las comunicaciones vehículo a vehículo (V2V) y vehículo-carretera (V2I).

Tabla 3. Valores de los parámetros de OFDM para el estándar IEEE 802.11p

Parámetro	Valor
Número de Sub-portadoras	52
Datos	48
Piloto	4
Espaciado entre sub-portadoras	156.25 KHz
Intervalo de Guarda	1.6 μ s
Duración del Símbolo	8 μ s

La capa física de este estándar está basado en la de IEEE 802.11a, sin embargo, se hicieron importantes adecuaciones. Las dos principales modificaciones son: la frecuencia de operación se estableció en 5.9 GHz y el ancho de banda utilizado es de 10MHz en lugar de los 20MHz que más comúnmente se emplean en IEEE

802.11a. Consecuentemente, con estos cambios los parámetros de la modulación utilizada (OFDM) fueron modificados, estos son presentados en la Tabla 3

Al igual que en IEEE 802.11a, para el estándar IEEE 802.11p están disponibles cuatro técnicas de modulación. Adicionalmente, la corrección de errores en recepción o FEC es utilizada para incrementar la probabilidad de una decodificación exitosa. Las 8 combinaciones de tasa de codificación y modulación utilizadas para IEEE 802.11p son mostradas en la Tabla 4. Es importante mencionar que un dispositivo que implemente la capa física de IEEE 802.11p debe soportar las tasas de datos de 3, 6 y 12 Mbps, las restantes, son opcionales.

Tabla 4. Esquemas de modulación y codificación disponibles para el estándar IEEE 802.11p y las tasas de datos alcanzadas con estos esquemas.

Técnica de Modulación	Tasa de Bits codificados (Mbps)	Tasa de codificación	Tasa de Datos (Mbps)	Datos Símbolo
BPSK	6	1/2	3	24
BPSK	6	3/4	4.5	36
QPSK	12	1/2	6	48
QPSK	12	3/4	9	72
16-QAM	24	1/2	12	96
16-QAM	24	3/4	18	144
64-QAM	36	2/3	24	192
64-QAM	36	3/4	27	216

2.8.1.2 Acceso al medio

Aunque las reglas de inicio de sesión han sido modificadas en el estándar IEEE 802.11p, las reglas que regulan la transmisión de cada paquete una vez que la estación ha ingresado a la red permanecen sin modificación (Kenney, 2011). Es decir, el acceso al medio en IEEE 802.11p aún está basado en el acceso múltiple por detección de portadora con prevención de colisiones (AMDP/EC o CSMA/CA por sus siglas en inglés). Aunque este mecanismo ofrece diversas ventajas tales como operar de manera distribuida y baja sobrecarga, debido a que CSMA/CA es un mecanismo basado en contención, el retardo para que un nodo acceda al

medio crece con la densidad de nodos. Este es un problema importante ya que en las VANETs puede existir una gran cantidad de nodos que compitan por el acceso al canal, por lo que el retardo de acceso al medio puede incrementarse de manera importante. Con el propósito de proporcionar la posibilidad de priorizar el acceso al medio de ciertos paquetes (e.g. mensajes de emergencia), el estándar IEEE 802.11p adaptó el mecanismo mejorado de acceso al canal (EDCA) del estándar IEEE 802.11e. EDCA extiende la funcionalidad del modo de función de coordinación distribuida (DCF) estableciendo cuatro diferentes categorías de acceso al medio, nombradas: AC_BK, AC_BE, AC_VI y AC_VO. Estas prioridades se establecen modificando los parámetros del algoritmo de contención. EDCA introduce una cola de transmisión para cada una de las categorías de acceso y cada una se comporta como una estación DCF independiente con su propio conjunto de parámetros.

Tabla 5. Valores de las ventanas mínimas y máximas para las diferentes categorías de acceso en el estándar IEEE 802.11p

Tipo de Tráfico	Cwmin,CWmax	AIFSN
AC_BK	15,511	7
AC_BE	15,511	3
AC_VI	7,15	2
AC_VO	3,7	2

Específicamente, la adaptación hecha en el estándar IEEE 802.11p consiste en asignar un conjunto de valores particulares para cada una de las categorías de acceso. Estos valores se muestra en la Tabla 5 tomada de (Han, Dianati, Tafazolli, Kernchen, & Shen, 2012). Como se puede observar de la Tabla 5, el estándar IEEE 802.11p asigna de manera diferenciada la probabilidad de acceso al medio definiendo distintos tiempos de espera para acceso al canal lo que modifica el tiempo de espera del algoritmo de “back off”. En este capítulo se presentan las generalidades más relevantes del estándar IEEE 802.11p para nuestro trabajo, si el lector está interesado en profundizar en los detalles de la capa física de este estándar, puede referirse a estas lecturas (IEEE, 2010b; Kenney, 2011).

2.8 Otros retos en el despliegue de las VANETs

Además del protocolo de enrutamiento, existen otros retos importantes de investigación que deben ser solucionados para el despliegue exitoso de una VANET. Estos retos incluyen aspectos desde la capa física hasta las capas superiores como se muestra en (Aquino Santos, Block, & Rangel Licea, 2012; Sichitiu & Kihl, 2008), por ejemplo:

- Nuevas propuestas de mecanismos de acceso al medio, e.g. (Abdel Hafeez et al., 2011) o adecuaciones al estándar IEEE 802.11p (Barradi, Hafid, & Gallardo, 2010).
- Modelado del flujo vehicular (Harri et al., 2009).
- Aspectos de seguridad y privacidad de la información en las VANETs (Shuhaimi & Juhana, 2012).
- Modelado del canal V2V (Mecklenbrauker et al., 2011)

Estos retos están fuera del alcance de este trabajo. El cual se centra en introducir las condiciones de propagación presentes en un escenario vehicular en las consideraciones de diseño de algoritmos de enrutamiento para comunicaciones V2V enfocados a escenario tipo carretera.

2.9 Resumen

En este capítulo se presentaron los aspectos más relevantes a una VANET y su contextualización dentro de las redes de datos. Específicamente, se estableció que de los escenarios vehiculares, el tipo carretera es uno de los más relevantes pues representa un porcentaje importante de los caminos existentes en diversos países como México y EEUU. Adicionalmente, también se estableció que dentro de este tipo de escenarios, las comunicaciones V2V juegan un rol clave para el mejoramiento de la seguridad y confort de los pasajeros y los mismos vehículos debido a su potencial para habilitar de forma ubicua la comunicación entre dos vehículos. Para las comunicaciones V2V en escenarios tipo carretera, las

condiciones de propagación de la señal impuestas han sido abordadas ampliamente en los últimos años. De los trabajos encontrados en la revisión de la literatura, sobresale el modelo presentado en (Karedal et al., 2011) el cual es derivado de una campaña de medición V2V exhaustiva. Adicionalmente, contempla tanto pérdidas por propagación como desvanecimientos lentos, dos de las cantidades más importantes en la caracterización del canal radio. Como se mencionó, la movilidad de los vehículos está íntimamente relacionada al escenario, en el caso de los escenarios tipo carretera el modelado de este elemento ha sido abordado en diferentes trabajos. Entre los modelados propuestos sobresalen los CFM ya que reflejan el comportamiento humano en la dinámica de los parámetros de movimiento (i.e. velocidad y aceleración). Entre los CFMs, uno de los más utilizados es el presentado en (Martin Treiber et al., 2000) llamado IDM que caracteriza el movimiento de los vehículos basado en la aceleración instantánea.

Otro aspecto relevante en las VANETs es la tecnología inalámbrica y de acceso al medio. Aunque se han propuesto diferentes tecnologías inalámbricas para la implementación de las VANETs, el estándar IEEE 802.11p, un esquema de acceso distribuido, ha emergido como la opción más prominente para el despliegue de las redes vehiculares. Sin embargo, como es bien conocido, las reglas de acceso al medio solo se encargan de regular el establecimiento del enlace y el uso del medio inalámbrico. Por lo tanto, cuando una aplicación necesita establecer una comunicación con un nodo más allá de su radio de cobertura es necesario que utilice los nodos intermedios. Esto, a través de un protocolo de enrutamiento. Finalmente, en este capítulo se estableció que los diferentes tipos de aplicación, i.e. seguridad, infotainment o eficiencia de recursos, demandan diferentes requerimientos en los protocolos de enrutamiento. Por ejemplo, las aplicaciones de seguridad generalmente requieren disseminar paquetes tipo *broadcast* puesto que son del interés de todos los vehículos dentro de una zona de relevancia. Por otro lado, aplicaciones de infotainment pueden

requerir el establecimiento de una comunicación punto a punto, por lo que un enfoque *unicast* sería más adecuado.

Capítulo 3

Protocolos de enrutamiento para VANETs en redes vehiculares.

Como se mencionó, las VANETs tienen el potencial de habilitar diferentes aplicaciones de seguridad (Chu & Huang, 2012) y confort (O. K. Tonguz & Boban, 2010) para los pasajeros de los vehículos. Un componente esencial para habilitar estas aplicaciones es el protocolo de enrutamiento. Cada aplicación tiene diferentes requerimientos e implica diferentes retos para el protocolo de enrutamiento. Por ejemplo, en una aplicación donde el conductor desea pedir el menú de un restaurante la información enviada solo concierne al vehículo que hace la petición y al restaurante que debe responder, además puede tolerar un retardo grande. Por lo tanto, los vehículos que se encuentran entre la fuente y el destino solo son potenciales retransmisores de la información. Por otro lado, si sucedió un accidente, esta información es de interés para todos los vehículos que circulan en el sentido que ha sido afectado y debe ser recibida en el menor tiempo posible para alertar a los conductores a tiempo. Esto, hace evidente que además del escenario, otro aspecto importante a tomar en cuenta cuando se diseña un protocolo de enrutamiento para VANETs es la aplicación para la que será utilizado. Es decir, la naturaleza de la información que deberá encaminar el protocolo es uno de los aspectos más importantes. Esto es, si la información es dirigida a un nodo en particular (*unicast*); o si es de interés general (*broadcast*). En este capítulo se describen a detalle los elementos básicos que conforman tanto los protocolos *unicast* como los enfocados a la diseminación de paquetes *broadcast*.

3.1 Unicast

Aunque las MANETs comparten varias características con las VANETS, el movimiento de los nodos en las redes vehiculares está restringido a patrones muy

específicos, es decir a las calles y carreteras. Adicionalmente, los vehículos cuentan con sistemas de ubicación geográfica como el sistema de posicionamiento global (GPS) y mapas digitales. Por lo tanto, una de las estrategias de enrutamiento *unicast* más eficientes para las VANETs es la basada en posición (Bernsen & Manivannan, 2009; Bilal, Bernardos, & Guerrero, 2013; Antnio Fonseca & Vazao, 2012b; F. Li & Wang, 2007). Por esto, un número importante de protocolos de enrutamiento *unicast* para VANETs utilizan este tipo de estrategia, e.g. (Dressler, Sommer, Eckhoff, & Tonguz, 2011; Lee, Lee, & Gerla, 2009b; Naumov & Gross, 2007; Sahu et al., 2010). Aún más, el proyecto GeoNet (Mariyasagayam, Menouar, & Len, 2008) dedicado a proveer conectividad transparente del protocolo de internet entre los vehículos y la infraestructura, considera el enrutamiento geográfico como parte esencial. Esto debido a las ventajas que presenta el enrutamiento basado en posición. De hecho, en (Taysi & Yavuz, 2012) se hace una recopilación de los protocolos de enrutamiento basados en posición y su idoneidad para el proyecto GeoNet.

No obstante las ventajas de que un protocolo de enrutamiento utilice la información de posición de los vehículos, diseñar un protocolo de enrutamiento eficaz para redes vehiculares no es una tarea sencilla. Esto debido a que aun dentro de estos patrones predefinidos de movimiento las variables del flujo vehicular, i.e. velocidad, aceleración, densidad de vehículos, pueden ser muy cambiantes, por lo tanto, la topología de la red se vuelve también muy dinámica. Aún más, estas mismas variables pueden cambiar de manera notable en una misma área geográfica. Por ejemplo de acuerdo a la hora del día la densidad de vehículos (nodos) puede pasar de muy alta en las horas pico a muy baja a lo largo del día. Por lo tanto, ésta dinámica presente en la topología de las VANETs debe ser manejada adecuadamente por el protocolo de enrutamiento. En resumen, un número significativo de protocolos utilizan los sistemas de navegación para implementar una estrategia de enrutamiento basada en posición. Esto debido a la ventaja que representa el conocer a priori los patrones de movilidad de los nodos

(vehículos). Estos patrones de movilidad dependen en gran medida del tipo de escenario, i.e. urbano o carretera. Aún más, otros aspectos importantes como los efectos del canal inalámbrico, la densidad de vehículos y la disponibilidad de infraestructura también dependen del escenario (Antnio Fonseca & Vazao, 2012b). Por ejemplo, la velocidad que alcanzan los vehículos en una carretera puede ser mucho mayor a la velocidad que alcanzan en una zona urbana. Adicionalmente, en un escenario urbano es común encontrar infraestructura disponible, sin embargo desplegar infraestructura a lo largo de toda la red de carreteras de un país resulta sumamente difícil debido al costo de la misma. Por lo tanto, la comunicación vehículo a vehículo puede ser una mejor estrategia en los escenarios tipo carretera. Así, un algoritmo de enrutamiento que ha sido diseñado considerando las características específicas de un escenario urbano, podría no desempeñarse adecuadamente en uno tipo carretera. Por lo tanto, es muy importante considerar las características específicas del escenario para diseñar un algoritmo de enrutamiento eficaz.

Los algoritmos *unicast* basados en posición (UBP) requieren al menos de 3 elementos básicos para su funcionamiento: el mecanismo de envío de paquetes de información topológica (PIT), el servicio de descubrimiento de posición y el algoritmo de disseminación de datos. Para lograr un buen desempeño del algoritmo de enrutamiento, es sumamente importante considerar los aspectos específicos del escenario en el diseño de cada uno de los elementos mencionados. Cada uno de estos tres elementos básicos es detallado en las siguientes secciones.

3.1.1 Mecanismo de envío de paquetes PIT

Los algoritmos de enrutamiento basados en posición utilizan la información geográfica propia y de sus vecinos para formar una topología de red. Comúnmente, cada nodo adquiere su propia información geográfica a través de un sistema de posicionamiento como el GPS. Sin embargo, se debe implementar un mecanismo que permita al protocolo de enrutamiento adquirir la información

geográfica de sus vecinos. El mecanismo más usado para adquirir esta información es el envío periódico de paquetes de información topológica (PIT) (Abedi, Fathy, & Taghilo, 2008; Dressler et al., 2011; Rao, Pai, Boussejra, & Mouzna, 2008b; Sahu et al., 2010). Este mecanismo es prácticamente un estándar de facto en los algoritmos basados en posición para redes ad-hoc.

Cuando este mecanismo es empleado, cada vehículo estructura un paquete (PIT) con su información geográfica y en algunos casos también los parámetros de desplazamiento (e.g. velocidad, dirección de movimiento, aceleración). Con el propósito de que sea decodificada por cada uno de los vehículos en la vecindad del transmisor, ésta información es enviada de manera periódica en paquetes *broadcast*. Cuando los PITs son recibidos, cada vehículo forma una tabla de vecinos con la información recibida para después, utilizarla cuando sea necesario. Se puede inferir fácilmente que entre mayor sea la frecuencia de envío de los PITs, la precisión de los datos en la tabla de vecinos mejora. Sin embargo, al aumentar la frecuencia de envío de los PITs también aumenta la sobrecarga generada. Así, este mecanismo presenta un compromiso entre la sobrecarga generada por el envío de paquetes y la precisión de los datos en la tabla de vecinos.

Diversos algoritmos de enrutamiento utilizan una frecuencia de envío de PITs fija (Abedi et al., 2008; Rao et al., 2008b; Santos, Alvarez, & Edwards, 2005). Sin embargo, esta estrategia afecta de manera importante la escalabilidad del protocolo de enrutamiento. Si la frecuencia de envío de los PITs es alta puede aumentar el retardo de acceso al medio debido al mayor número de colisiones. Por otro lado si la frecuencia es baja, puede ocasionar un mayor número de saltos del paquete hacia su destino. Para solucionar este problema, algunos algoritmos de enrutamiento implementan una estrategia que adapta la frecuencia de envío de los PITs a alguno de los parámetros de la red, e.g. velocidad (Sahu et al., 2010) o densidad de vehículos (Naumov & Gross, 2007). Una estrategia adaptativa favorece el aprovechamiento de los recursos. Sin embargo, si no es diseñada

cuidadosamente puede impactar negativamente en los parámetros de desempeño del protocolo de enrutamiento. Por ejemplo, si la frecuencia de envío de los PITs es baja al igual que la densidad de vehículos, el tiempo de vida de los enlaces puede disminuir dramáticamente. Por ejemplo en la Figura 5 N_2 entra en el radio de cobertura de N_1 en el instante T_1 , sin embargo dado que N_2 envía su primer mensaje hasta T_2 , no puede ser considerado como vecino antes de este tiempo.

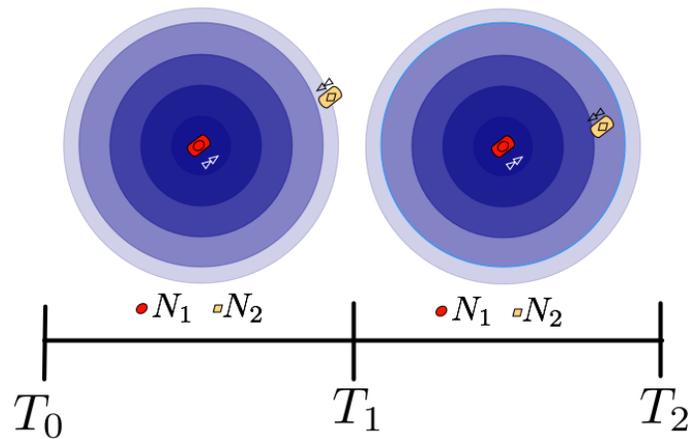


Figura 5. Registro de un vehículo en la tabla de vecinos a través del intercambio de PITs

Si en el ejemplo anterior asumimos que ambos vehículos se mueven a v_1 y v_2 m/s respectivamente y ambos tienen un radio de cobertura R . El enlace entre ambos tendrá una fracción de la duración posible (ver Ecuación (4)) a pesar de que dos vehículos están dentro del radio de alcance del transceptor inalámbrico uno del otro desde el instante T_1 .

$$\frac{2R}{v_1 + v_2} \quad (4)$$

Dado que parámetros como la velocidad y densidad de vehículos dependen en gran medida del escenario de aplicación (e.g. carretera, urbano). Entonces, se puede inferir fácilmente que la frecuencia adecuada de envío de los PITs depende de igual manera del escenario de aplicación.

3.1.2 Servicio de descubrimiento de posición (SDP)

En los algoritmos de enrutamiento basados en posición es necesario conocer la ubicación geográfica del destino previo al envío de datos. Para este fin, en diversas estrategias de enrutamiento encontradas en la literatura se asume un servicio de descubrimiento ideal (Jerbi et al., 2009; Rao et al., 2008b). Es decir, se asume que al momento de enviar los datos hacia un destino en particular se conoce la ubicación geográfica del mismo. Así, el algoritmo de enrutamiento solo debe enviar los datos hacia esa dirección. En un ambiente urbano, donde existe la infraestructura disponible, asumir la existencia de un servicio de localización externo podría ser una opción adecuada. Sin embargo, en un escenario donde la existencia de infraestructura no está garantizada (e.g. carretera, rural) es necesario que el algoritmo de enrutamiento considere un servicio de descubrimiento integrado. Aún más, un problema importante al asumir un servicio de descubrimiento ideal es que al evaluar el desempeño del algoritmo no se conoce el impacto del servicio de descubrimiento en el tiempo de la entrega del paquete. En la literatura pueden encontrarse diversos algoritmos de enrutamiento que cuentan con un servicio de descubrimiento de posición integrado, principalmente en los que están enfocados a escenarios tipo carretera como los presentados en (Naumov & Gross, 2007; Sahu et al., 2010).

3.1.3 Diseminación de datos

Una vez que el SDP entrega la ubicación geográfica del destino, el módulo de diseminación de datos es el encargado de encaminar los datos hacia la ubicación geográfica. Es una práctica común que en el encabezado del paquete de datos se incluya la dirección de propagación o la ubicación geográfica hacia la que se dirige el paquete. Así, en los algoritmos basados en posición, cada nodo intermedio puede decidir cuál de sus vecinos es el más apto para reenviar el paquete de datos. Los protocolos basados en posición comúnmente eligen como nodo retransmisor al vecino que representa mayor avance en la dirección de

propagación del paquete, este método es conocido como reenvío codicioso (RC). De acuerdo a (Bilal et al., 2013), basados en RC, existen tres variantes principales utilizadas por los protocolos de enrutamiento basados en posición: RC mejorado (RCM) donde antes de seleccionar el próximo salto se actualiza la posición de los nodos almacenados en la tabla de vecinos utilizando la información de aceleración y velocidad; RC direccional (RCD) el cual solo considera los vehículos moviéndose en la dirección de propagación del mensaje; y RCD predictivo (RCDP) el cual construye su tabla de vecinos a uno y dos saltos, antes de seleccionar el siguiente salto predice la posición de todos los nodos en su tabla de vecinos (como en RCM) y elige como siguiente salto al nodo cuyo vecino a un salto se esté moviendo en la misma dirección del destino y esté más cerca de él. De la clasificación hecha en (Bilal et al., 2013) se puede observar que aunque RCDP y RCM consideran la movilidad de los vehículos a través de un algoritmo de predicción, ninguno de estos métodos considera los efectos del canal radio en la determinación del siguiente salto. Aunque elegir al vecino más cercano al destino podría representar que el paquete de datos arribe en un menor número de saltos al destino, las difíciles condiciones de propagación inherentes al medio inalámbrico pueden ocasionar una significativa pérdida de paquetes. De hecho, como lo indican en los trabajos presentados en (Karedal et al., 2011; Mecklenbrauker et al., 2011), las condiciones de propagación están íntimamente relacionadas con el escenario. Por ejemplo, en una zona urbana los edificios representan obstáculos que obstruyen la propagación de la señal de radio. Por otro lado, en una carretera el efecto *doppler* es más significativo debido a las altas velocidades que pueden presentarse en este tipo de escenarios.

Por lo anterior, al igual que los dos módulos anteriores la disseminación de datos también debe ser cuidadosamente diseñada considerando los aspectos específicos del escenario donde se desempeñara el algoritmo de enrutamiento.

3.1.4 Algoritmo de predicción de Posición

El algoritmo de predicción de posición (APP) utiliza la información topológica almacenada en la tabla de vecinos (e.g. velocidad, aceleración) para predecir la posición de los vecinos en un instante T posterior a la última recepción de un PIT. Aunque no es un módulo esencial, el APP es una parte importante del protocolo de enrutamiento debido a la alta movilidad de los vehículos. Al igual que los módulos anteriores, para obtener un desempeño eficaz del APP se debe considerar en su diseño el escenario donde será implementado. Por ejemplo, en una ciudad el APP debe tomar en cuenta que los vehículos pueden cambiar de dirección cada vez que llegan a una intersección. Por otro lado, en las carreteras, un mismo grupo de vehículos pueden permanecer juntos por un tiempo más prolongado (Antnio Fonseca & Vazao, 2012b). Sin embargo, la aceleración puede ser mucho mayor al igual que la velocidad, por lo que el APP debe adaptarse rápidamente.

3.1.6 Métricas de desempeño

Para la evaluación de un protocolo de enrutamiento es de suma importancia medir los parámetros más representativos de su desempeño. Éstos, pueden ser determinados a partir de analizar el objetivo del protocolo de enrutamiento, el cual, es principalmente proveer un conjunto de nodos a través de los cuales un paquete viaje para llegar a su destino, en el menor tiempo y con el menor número de paquetes de control. Así, las métricas más comúnmente utilizadas son evidentes:

- tasa de paquetes entregados al destino
- retardo desde la fuente hasta el destino (EED)
- cantidad de paquetes utilizado por el protocolo de enrutamiento para su operación (NPC).

En una evaluación más detallada otras métricas pueden ser consideradas. Específicamente, se puede medir el impacto de la sobrecarga en el acceso al medio, esto puede ser a través del registro del tiempo que tarda un nodo en

entregar un paquete al siguiente salto. Adicionalmente, para evaluar la eficiencia del mecanismo de selección, puede contabilizarse el número de saltos que el paquete da para alcanzar el destino. Finalmente, además de la sobrecarga de control, es también necesario medir la sobrecarga que la operación del protocolo introduce en el método de acceso al medio. De esta manera, tres métricas adicionales son utilizadas en este trabajo para evaluar el desempeño de las estrategias de enrutamiento:

- Retardo por salto
- Número de saltos
- Sobrecarga en MAC

3.1.5 Estado del arte en los algoritmos de encaminamiento *unicast* enfocados a VANETs

Los algoritmos de enrutamiento *unicast* son utilizados principalmente en aplicaciones donde la información que se transmitirá es relevante solo para la fuente y el vehículo destino. Por ejemplo, el conductor de un vehículo desea saber si en una estación de servicio cuenta con determinado tipo de gasolina; o los ocupantes de un vehículo desean solicitar el menú del día mientras se desplazan hacia un restaurante (ver Figura 6). Por lo tanto, los protocolos de enrutamiento *unicast* deben conocer la dirección del destino antes de iniciar la transmisión de los datos, por lo que este tipo de protocolos debe hacer uso de un mecanismo que provea la dirección del destino para posteriormente iniciar la diseminación de los datos. Por otra parte, los protocolos de enrutamiento *broadcast* son empleados principalmente en aplicaciones de seguridad (Amoroso, Marfia, & Roccetti, 2011; Chu & Huang, 2012; Wu, Kumekawa, & Kato, 2010). Por lo tanto, tienen como objetivo diseminar información relevante no solo para una fuente en particular sino para un grupo o zona de relevancia.

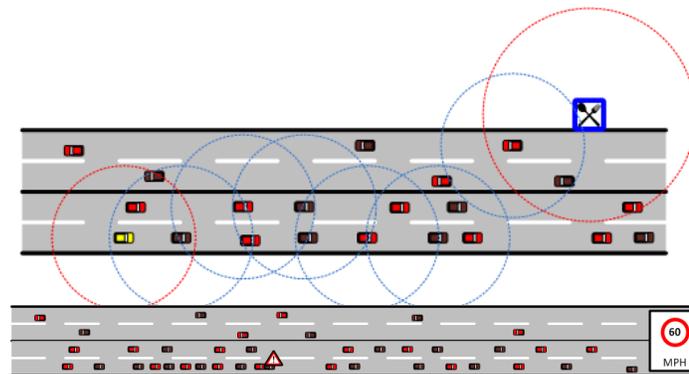


Figura 6. Posibles aplicaciones habilitadas por los protocolos de encaminamiento *unicast*

El problema de enrutamiento *unicast* en las redes vehiculares ad-hoc (conocidas como VANETs por su acrónimo en inglés) fue abordado inicialmente con algoritmos diseñados para las redes móviles ad-hoc o MANETs por su acrónimo en inglés, como AODV, DSR y GPSR (Chaurasia et al., 2012). Sin embargo, estos protocolos no fueron diseñados tomando en cuenta aspectos importantes presentes en las redes vehiculares tales como: la alta movilidad y la aceleración de los vehículos, así como un entorno de propagación altamente dinámico. Por lo tanto, el buen desempeño que estos protocolos de enrutamiento muestran en escenarios de baja movilidad, no es obtenido en los escenarios específicos de las VANETs. Posteriormente, con el propósito de superar las restricciones impuestas por los escenarios vehiculares, se propusieron protocolos de enrutamiento desarrollado ex profeso para VANETs tales como (Jerbi et al., 2009; Lee et al., 2009a; Shafiee & Leung, 2011). En (Jerbi et al., 2009) los autores introducen un algoritmo de enrutamiento *unicast* basado en intersecciones para VANETs en escenarios urbanos llamado GyTAR. Este algoritmo tiene tres módulos principales: estimación de tráfico, selección de intersección y diseminación de datos entre intersecciones. Los autores en (Jerbi et al., 2009) asumen la existencia de enrutadores inalámbricos fijos. Dado que GyTAR está enfocado para escenarios urbanos la presencia de infraestructura es una suposición razonable. Sin embargo, en escenarios tipo carretera la existencia de unidades fijas es un requisito que

puede ser difícil de cubrir debido al costo de las mismas. En GyTAR se asume que existe un servicio de localización (SL) ideal, el cual provee a la fuente con la ubicación geográfica del destino. Este supuesto dificulta la evaluación del impacto que tiene el servicio de localización sobre las métricas de desempeño del protocolo. Para la evaluación de GyTAR se considera un radio de cobertura basado en modelo de dos rayos. Otro protocolo basado en intersecciones para VANETs en escenarios urbanos es CMGR, el cual es introducido en (Shafiee & Leung, 2011). En CMGR, los autores proponen un mecanismo para descubrir al menos una puerta de enlace hacia internet que este en la red dorsal. Cuando un paquete se disemina entre intersecciones, al igual que en GyTAR, CMGR considera como siguiente salto al vecino más lejano en la dirección del destino (reenvío codicioso). El mecanismo propuesto en CMGR para descubrir las puertas de enlace es similar al proceso de establecimiento de ruta en AODV. El protocolo CMGR utiliza paquetes tipo *broadcast* en el descubrimiento de ruta, lo cual podría permitir una diseminación más rápida de la información. Sin embargo, CMGR no considera un mecanismo de redundancia, el cual es de suma importancia en la transmisión de paquetes *broadcast*, debido a dos aspectos importantes: este tipo de paquetes no cuentan con un mecanismo de protección, por lo que el problema de la terminal escondida se acentúa. Aún más, las severas condiciones impuestas por el canal inalámbrico pueden ocasionar que un gran número de paquetes no arribe al destino deseado. CMGR y GyTAR abordan varios de los retos que comúnmente están presentes en las VANETs. Sin embargo, debido a que ambos dependen de una infraestructura subyacente, puede establecerse que la elección de estos protocolos para su implementación en escenarios tipo carretera no es la más adecuada (Vinel, 2012). Además, como lo muestran los resultados de (Karedal et al., 2011), el comportamiento del canal radio en escenarios tipo carretera no corresponde con los modelos de propagación utilizados en la evaluación de GyTAR y CMGR. El trabajo presentado en (Lee et al., 2009b) introduce otro algoritmo de enrutamiento enfocado a escenarios urbanos llamado TO-GO. Este algoritmo emplea una estrategia geo-oportunista en la diseminación

de los datos. Para elegir al siguiente vehículo retransmisor, TO-GO requiere del conocimiento de la topología de su vecindario a 2 saltos. Con el propósito de que todos los vehículos en el vecindario adquieran el conocimiento de la topología a dos saltos de la red, cada vehículo adjunta sus propios vecinos en un paquete que envía de periódicamente (*beacon*). Por lo tanto, cada vehículo tiene la información de sus vecinos a un salto y también la de los vecinos a dos saltos. Con esta información cada vehículo construye una tabla de vecinos de donde selecciona, cuando es necesario, el retransmisor primario y el conjunto de nodos de respaldo. Con el propósito de eliminar el problema de la tormenta de *broadcast*, TO-GO selecciona solo vehículos que se escuchen entre sí para integrar el conjunto de nodos de respaldo. Esta selección la realiza a través de un proceso complejo, que involucra la utilización de filtros de Bloom (Guo, Liu, Li, & Yang, 2010). Tanto el retransmisor primario como el conjunto de nodos de respaldo implementan un temporizador basado en distancia antes de reenviar el paquete. Los nodos de respaldo no cancelan el temporizador a menos que reciban el paquete de datos proveniente del retransmisor primario. Es importante resaltar que los filtros de bloom pueden arrojar falsos positivos, principalmente cuando son aplicados a conjuntos de datos dinámicos (Guo et al., 2010) lo que puede causar retransmisiones no deseadas. Aunque (Lee et al., 2009a) reporta buenas métricas de desempeño obtenidas para TO-GO considerando un modelo de propagación no determinista, el modelo utilizado no fue desarrollado ex profeso para comunicaciones vehículo a vehículo (V2V). Finalmente, es importante mencionar que TO-GO no incluye un mecanismo de descubrimiento de posición. CAR es un protocolo de enrutamiento desarrollado para escenarios urbanos y tipo carretera. Este protocolo incluye un mecanismo de descubrimiento de posición, el cual está basado en la técnica de reenvío de *broadcast* por grupo preferente o PGB (Naumov, R., & T., 2006) por sus siglas en inglés. CAR agrega el identificador de cada vehículo al paquete *broadcast* si la dirección de su vector de velocidad no es paralela al vector de velocidad del retransmisor anterior. La estrategia de descubrimiento de posición de CAR incluye un mecanismo de retransmisión: si el

retransmisor primario no recibe el mismo paquete que reenvió, proveniente de un vecino más lejano en la dirección de propagación, entonces vuelve a retransmitir el paquete. Aunque este mecanismo de retransmisión es de utilidad para disminuir los intentos de búsqueda fallidos, también puede generar múltiples retransmisiones no deseadas. Una vez que el destino ha sido encontrado, el paquete de descubrimiento regresa hacia la fuente utilizando paquetes *unicast*. Esto tiene una desventaja principal, otros vehículos ubicados entre la fuente y el destino no tienen conocimiento de la búsqueda, lo que puede ocasionar búsquedas innecesarias con el consecuente uso ineficiente de recursos. Con el objetivo de solucionar algunos de los problemas mostrados por GPSR, una modificación a este algoritmo llamada GPSR-L es presentada en (Rao et al., 2008b). Con el propósito de solucionar la falta de un algoritmo de predicción en GPSR, GPSR-L asigna un tiempo de vida a cada uno de los enlaces almacenados en la tabla de vecinos. La introducción de este tiempo de vida está enfocada en disminuir la selección errónea del próximo salto causada por información no actualizada en la tabla de vecinos. En GPSR-L no se consideran los efectos que el canal inalámbrico tiene sobre la transmisión de los paquetes en la selección del siguiente salto. Por lo tanto, no obstante la introducción del tiempo de vida para cada uno de los enlaces, las selecciones erróneas aún pueden ser frecuentes. Otro protocolo enfocado a redes vehiculares encontrado frecuentemente en la literatura es LORA-CBF el cual fue introducido en (Santos et al., 2005). LORA-CBF incluye su propio mecanismo de descubrimiento de posición basado en paquetes *broadcast*. Con el propósito de evitar el problema de la tormenta de *broadcast*, LORA-CBF construye una topología basada en grupos (*clusters*) donde a cada vehículo se le asigna un rol específico. Una vez formada la topología, solo las puertas de enlace (*gateways*) y los jefes de grupo (*cluster heads*) tienen permitido reenviar los paquetes de descubrimiento. En (Aquino-Santos et al., 2009), los autores evalúan el desempeño de LORA-CBF, AODV, DSR y GPSR, y muestran que las métricas obtenidas para LORA-CBF en diversos escenarios tipo carretera superan a las obtenidas para AODV, DSR y GPSR bajo las mismas

condiciones de evaluación. Aunque la organización jerárquica permite disminuir la cantidad de *broadcast* redundantes, los autores en (Santos et al., 2005) consideran un modelo de propagación ideal en la formación de los grupos. Por lo tanto, LORA-CBF no garantiza la estabilidad de los grupos en escenarios tipo carretera. Esto puede ocasionar pérdida de paquetes y/o mayores retardos, debido a que dependiendo de las condiciones del canal en un determinado momento, la formación de los grupos puede tomar mayor tiempo o incluso pueden existir varios grupos formados por un solo miembro. Finalmente, una vez que descubre la posición del destino LORA-CBF utiliza el reenvío codicioso avanzado para la disseminación de los datos (AGF por sus siglas en inglés). Como se explica más adelante, cuando se utiliza la técnica de AGF un gran número de paquetes pueden perderse debido a los efectos del canal inalámbrico sobre la transmisión de los mismos. DDOR es un protocolo desarrollado específicamente para VANETs desplegadas en escenarios tipo carretera introducido en (Sahu et al., 2010). Por lo tanto, DDOR ofrece varias ventajas comparado con los protocolos anteriores, principalmente un servicio de localización distribuido y un mecanismo de predicción basado en la velocidad y aceleración de los vehículos. Con el propósito de disminuir el problema de la terminal escondida, DDOR propone habilitar el mecanismo de protección RTS/CTS del estándar IEEE 802.11. Además, considera una estrategia de retransmisión debido a que el mecanismo de descubrimiento de posición utiliza paquetes *unicast*. Debido a la inclusión de estos mecanismos en DDOR, este protocolo puede considerarse adecuado para VANETs desplegadas en escenarios tipo carretera. Sin embargo, una problemática en DDOR es que no controla el mecanismo utilizado para la reservación del canal (RTS/CTS). Lo que puede ocasionar que ante una selección errónea del siguiente salto, este mecanismo genere una sobrecarga significativa en la capa de acceso al medio (MAC). A pesar de esto, en escenarios tipo carretera DDOR resuelve varias de las diferentes problemáticas mostradas de los protocolos antes mencionados. De hecho, los autores en (Sahu et al., 2010) muestran que las métricas obtenidas

para DDOR en diversos escenarios tipo carretera superan a las obtenidas para AODV, DSR y GPSR bajo las mismas condiciones de evaluación.

El estudio cualitativo realizado en (Antnio Fonseca & Vazao, 2012b) establece que comparado con CAR y GPSR, GPSR-L podría ofrecer un mejor desempeño en escenarios tipo carretera. Sin embargo GPSR-L no fue desarrollado ex profeso para este tipo de escenarios. Por lo tanto, carece de un mecanismo de descubrimiento de posición, así como de una estrategia para contrarrestar el impacto de la aceleración de los vehículos en el tiempo de vida del enlace entre dos vehículos. Como lo hemos mencionado, ambos módulos son muy importantes para la operación independiente del algoritmo de enrutamiento.

Una característica común de los algoritmos previamente mencionados es que la mayoría de ellos no fueron diseñados tomando en cuenta las características específicas del canal inalámbrico. Aún más, muchos de ellos fueron evaluados tomando en cuenta condiciones de propagación que no corresponden a las que presentan las comunicaciones vehículo a vehículo (V2V). Incluso, algunos de los protocolos mencionados consideran condiciones de propagación ideales en la evaluación de la estrategia propuesta. Considerar un canal con estas características puede ser un buen inicio para la evaluación y diseño de la estrategia de enrutamiento. Sin embargo, en (Gozalvez, Sepulcre, & Bauza, 2010b) los autores muestran que al evaluar un protocolo de enrutamiento bajo diferentes modelos de canal, los resultados obtenidos para el desempeño de las métricas del protocolo es también distinto. Esto es debido a las consideraciones hechas en el modelado del canal. Por ejemplo, en condiciones ideales la dirección relativa de los vehículos no tiene ningún impacto sobre la propagación de un paquete. Sin embargo, como se muestra en (Acosta-Marum & Ingram, 2007b; Lee et al., 2009b) en un escenario tipo carretera la dirección relativa de los vehículos tienen un impacto significativo en la propagación de un paquete. Debido a que es difícil contar con un gran número de vehículos para evaluar en campo una estrategia de enrutamiento, muchos de ellos son evaluados a través de

simulación. Por lo tanto, es de suma importancia considerar un modelo de propagación que se adecue a las condiciones de propagación existentes en un escenario real.

De la discusión anterior podemos establecer que hay dos puntos importantes a tomar en cuenta al diseñar un nuevo algoritmo de enrutamiento para redes vehiculares desplegadas en carreteras. Para una evaluación más realista de la estrategia de enrutamiento se debe incluir un modelo de propagación acorde al escenario. Un algoritmo de enrutamiento que no dependa de infraestructura se puede adaptar más fácilmente a un escenario tipo carretera por la posible ausencia de esta. Por lo tanto, incluir un algoritmo de descubrimiento de posición en el diseño de la estrategia de enrutamiento es muy importante. Con el propósito de facilitar la comparación entre los protocolos de enrutamiento *unicast* para VANETs encontrados en la literatura, se presenta la siguiente Tabla 6 donde se resumen las características más importantes de cada uno.

Tabla 6 Tabla comparativa de los protocolos de enrutamiento *unicast* más relevantes en la literatura

Protocolo	Escenario	PITs	SL	Predicción	Tasa de Tx	Canal
GyTAR	Urbano	Fijo	No	Si	2 Mbps	No
CMGR	Urbano	Fijo	Si	No	1 Mbps	No
TO-GO	Urbano	Fijo	No	Si	2 Mbps	No
CAR	Urbano/ Carretera	Adaptativo / densidad	Si	No	1/11 Mbps	No
LORA-CBF	Carretera	Fijo	Si	Si	1/11 Mbps	No
DDOR	Carretera	Adaptativo / posicional	Si	Si	2 Mbps	No
GPSR-L	Carretera	Fijo	No	Si	NR	No
FPBR	Carretera	Fijo	Si	Si	6 Mbps	Si

El campo escenario indica el escenario de diseño del protocolo de enrutamiento; la columna PITs indica si la frecuencia de intercambio de estos paquetes es fija o adaptativa; el campo SL indica si el protocolo en cuestión cuenta con un servicio de localización; la columna de Predicción indica si el algoritmo realiza una

predicción para actualizar la posición de los vehículos almacenada en la tabla de vecinos antes de seleccionar el siguiente salto; dado que todos los protocolos consideran el estándar IEEE 802.11, la columna Tasa de Tx indica la tasa de transmisión considerada para la evaluación del protocolo; finalmente, la columna canal indica si el protocolo de enrutamiento considera los efectos del canal radio en su diseño.

3.2 Algoritmos de diseminación de *broadcast*

Como se mencionó anteriormente, los algoritmos de enrutamiento para redes vehiculares se pueden dividir en dos grandes grupos, i.e. *unicast* y *broadcast*. Los algoritmos *unicast* están enfocados para aplicaciones donde solo la fuente y el destino necesitan establecer un enlace para el intercambio de información. Por otro lado, los algoritmos de enrutamiento *broadcast* (también llamado algoritmo de diseminación (Sooksan Panichpapiboon & Pattara-atikom, 2011)) son empleados donde la información es de interés de un grupo de vehículos o de una zona geográfica en particular (ver Figura 7).



Figura 7. Diseminación de un mensaje *broadcast* para indicar que ha ocurrido un accidente, ejemplo de una aplicación habilitada por un protocolo de difusión *broadcast*.

En esta sección se presenta en primer plano los diferentes enfoques que existen para los algoritmos de enrutamiento *broadcast*. Posteriormente, se introducen los elementos básicos para el diseño de un protocolo de diseminación *broadcast* orientado al transmisor enfocado a escenarios tipo carretera. Finalmente, se presenta el estado del arte en este tipo de protocolos.

3.2.1 Clasificación

Los algoritmos de enrutamiento *broadcast* son principalmente usados en aplicaciones enfocadas en proveer seguridad a los conductores y pasajeros de los vehículos (Amoroso et al., 2011; Chu & Huang, 2012; Wu et al., 2010), e.g. aviso de accidente, camino peligroso, cambio de carril, etcétera. Como se puede inferir de estos ejemplos, los interesados en recibir la información de este tipo de aplicaciones son todos los vehículos que se encuentre dentro de una zona específica. Por lo tanto, el uso de paquetes *broadcast* se adecua mejor a las aplicaciones donde está involucrada la seguridad. La zona de relevancia, es decir, la zona geográfica hacia donde se debe diseminar la información, en los algoritmos *broadcast* depende de la aplicación y el escenario en particular. Por ejemplo, si se desea diseminar la información de un choque de automóviles en una carretera de dos carriles, uno en cada sentido, la información de este evento es relevante para ambos sentidos de la carretera. Sin embargo, si el choque ocurrió en una carretera con más de un carril en cada sentido y solo afecto a uno de estos, entonces la información podría ser solo relevante para los vehículos que transitan en la dirección del sentido afectado.

La forma más básica de diseminar paquetes *broadcast* es que cada nodo que haya recibido por primera vez el mensaje lo reenvíe sin restricción alguna. A este mecanismo se le conoce comúnmente como inundación (*flooding*). Aunque es extremadamente sencillo, este mecanismo tiene también grandes inconvenientes. El principal de estos inconvenientes es que la cantidad de paquetes reenviados puede ocasionar dos problemas importantes: las colisiones entre los paquetes retransmitidos aumentan de manera importante; y además se genera un alto nivel de contención por acceder al medio. La conjugación de estos dos problemas es conocida como la tormenta de *broadcast*. La tormenta de *broadcast* ocasiona un uso ineficiente de los recursos y aún más, el número excesivo de colisiones incluso puede ocasionar que el paquete no sea diseminado hasta el final de la zona de relevancia (ZOR) (Wisitpongphan, N. et al., 2007). En la literatura se

pueden encontrar diversas técnicas que están enfocadas en mitigar el problema de la tormenta de *broadcast* a través de suprimir el mayor número de retransmisiones redundantes, como las presentadas en (Wisitpongphan, N. et al., 2007). Sin embargo, es importante distinguir las técnicas de supresión de *broadcast* (TSB) de los algoritmos de diseminación *broadcast*. Como se mencionó, las TSB están enfocadas en suprimir el mayor número de transmisiones redundantes. Por otro lado, los algoritmos de enrutamiento *broadcast* deben ser capaces de garantizar la diseminación de un paquete a la mayor cantidad de nodos dentro de la zona de relevancia. Es decir, los algoritmos de enrutamiento *broadcast* hacen uso de las TSB para diseminar el paquete de una manera más eficiente e.g. (O. Tonguz, Wisitpongphan, & Bai, 2010). Por lo tanto, es importante mencionar que aunque la TSB es la parte central del algoritmo de enrutamiento *broadcast*, este último incluye procesos adicionales que deben ser considerados.

En la literatura se pueden encontrar diferentes clasificaciones de los algoritmos de diseminación, e.g. (Bakhouya, Gaber, & Lorenz, 2011; Karagiannis et al., 2011; Sooksan Panichpapiboon & Pattara-atikom, 2011). Sin embargo, es importante hacer notar que en estos trabajos se clasifica a los algoritmos de diseminación de acuerdo a la TSB que se emplea. No obstante que la TSB es una parte central del algoritmo de diseminación, existen otros aspectos relevantes propios de los algoritmos de diseminación que reflejan mejor su funcionamiento. Por ejemplo, si cuentan con un mecanismo para compartir información que ayude en la decisión de retransmitir o no el paquete; o si se hace uso solo de información local.

En este trabajo presentamos la revisión de la literatura agrupada bajo dos principales categorías: algoritmos de diseminación *broadcast* no asistidos, i.e. algoritmos que no cuentan con un mecanismo periódico de intercambio de PITs, y en los que la decisión de reenvío se realiza exclusivamente con información local. La segunda clasificación son los algoritmos asistidos, i.e. protocolos que cuentan con un mecanismo que periódicamente comparte información del vecindario. Contar con información relativa a la topología del vecindario abre la posibilidad de

que la decisión de retransmitir un mensaje sea tomada por el propio retransmisor primario antes que el paquete sea enviado al medio. Por lo tanto, los algoritmos asistidos fueron subdivididos como lo sugieren los autores en (Wisitpongphan, N. et al., 2007; Wu, Ohzahata, & Kato, 2012). Es decir, en diseminación orientada al transmisor si el retransmisor es elegido a priori o diseminación orientada al receptor si cada uno de los nodos que reciben el paquete toma la decisión de retransmitir o no el mensaje.

Dado que esta clasificación que se presenta refleja mejor las características de los algoritmos de diseminación, la revisión de la literatura reciente de los algoritmos de diseminación *broadcast* realizada en este trabajo se agrupan en primera instancia bajo la nueva clasificación para posteriormente utilizar la subclasificaciones presentada en (Bakhouya et al., 2011; Karagiannis et al., 2011; Sooksan Panichpapiboon & Pattara-atikom, 2011) (ver Figura 8).

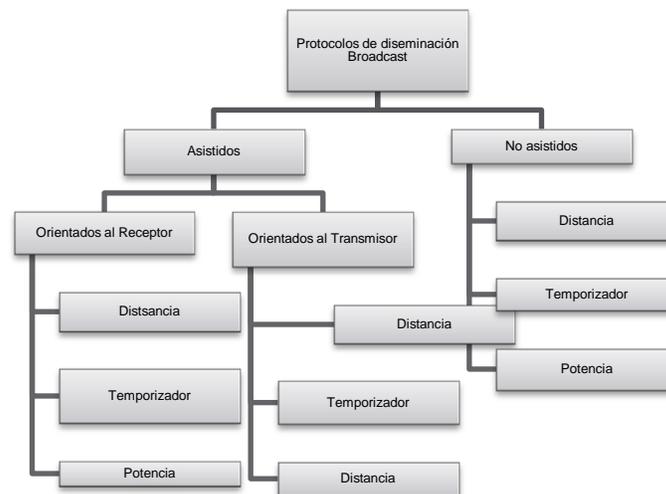


Figura 8. Una clasificación de protocolos de difusión para redes vehiculares ad-hoc (VANETs)

Es importante mencionar que en la diseminación de un mensaje existe un compromiso entre la cantidad de retransmisiones que son evitadas por el algoritmo de diseminación y la robustez del mismo. Es decir, si se suprime una gran cantidad de retransmisiones disminuirá la contención y el número de

colisiones. Sin embargo, se corre el riesgo de que el mensaje no alcance el final de la zona de relevancia. Como se mencionó en la sección anterior, las dos principales clasificaciones bajo las cuales se pueden agrupar los algoritmos de disseminación son: protocolos de disseminación asistidos y protocolos de disseminación no asistidos. Los algoritmos de disseminación no asistidos generalmente definen un umbral relacionado a un parámetro en particular. Por ejemplo, la distancia que el paquete ha viajado (Schwartz, R. Barbosa, Meratnia, Heijenk, & Scholten, 2011; O. Tonguz et al., 2010) o el número de copias del paquete que se han recibido (Bakhouya et al., 2011). En los algoritmos no asistidos, cuando se recibe un paquete cada vehículo evalúa si supera el umbral establecido para decidir si retransmite el paquete o no, e.g. si su ubicación geográfica representa mayor avance en la dirección de propagación que la mínima establecida. Es importante recordar que en los protocolos no asistidos la decisión de retransmitir o no se toma solo en base a la información local y la que contiene el paquete recibido. Por lo tanto, los algoritmos no asistidos no pueden solucionar por completo el compromiso entre robustez y redundancia. Adicionalmente, se prevé que el envío de PITs sea la forma en como los vehículos detecten a los vehículos vecinos (Ghafoor et al., 2011). Así, los protocolos no asistidos desaprovechan ésta información disponible para la toma de mejores decisiones. Debido a esto, los algoritmos no asistidos presentan mayores dificultades para manejar adecuadamente el compromiso entre la sobrecarga y el número de nodos alcanzados dentro de la ZOR (Wu et al., 2012). Adicionalmente, como se había establecido, los escenarios tipo carretera son uno de los más relevantes en las VANETs. Por lo tanto, en este trabajo se enfoca en los protocolos de disseminación asistidos orientados al transmisor en escenarios tipo carretera.

3.2.2 Módulos básicos de un protocolo de diseminación asistido orientado al transmisor

3.2.2.1 Mecanismo de envío de PITs

El objetivo de los PITs es reflejar con la mayor precisión posible la topología de la red para tomar una mejor decisión de reenvío. Usando la frecuencia de envío más baja, con el propósito de generar la menor sobrecarga posible. Sin embargo las condiciones en un escenario tipo vehicular son muy variables. Por ejemplo, un vehículo puede pasar de estar en una densidad vehicular muy alta a una muy baja en cuestión de segundos (e.g. si va por una vía principal y se encuentra con un accidente). De este ejemplo, se puede inferir fácilmente que una frecuencia de actualización para los PITs fija afecta de manera importante la escalabilidad y la robustez del protocolo de diseminación. Esto es, se afecta la escalabilidad debido a que la cantidad de PITs que compiten por acceder al medio es directamente proporcional al número de vehículos aumentando así el retardo de acceso al medio. Adicionalmente, se afecta la robustez de la propuesta pues si la frecuencia de actualización para los PITs es elegida considerando un escenario de baja densidad (i.e. frecuencia alta) congestionara el medio cuando la densidad aumente y viceversa. No obstante, los protocolos antes mencionados están enfocados solo en atender el compromiso entre la robustez y la cantidad de mensajes redundantes a través de la TSB propuesta. Sin embargo, una cuestión importante es que la frecuencia de envío de PITs no es considerada como un factor determinante en el diseño de estos protocolos, pues solo se sugiere un valor constante para la misma lo que afecta de manera importante la escalabilidad y robustez de la propuesta, como se mencionó anteriormente. Dado que el objetivo del intercambio de PITs en un algoritmo *broadcast* es reflejar de la manera más precisa posible la topología del vecindario, la frecuencia con que se intercambian estos paquetes depende en gran medida de las condiciones del escenario. Por esta razón, un mecanismo que adapte la frecuencia del intercambio de PITs a las condiciones del escenario podría disminuir la carga generada por los protocolos de

diseminación. Sin embargo, la mayoría de los protocolos de diseminación *broadcast* utilizan una frecuencia fija, por ejemplo los presentados por (Liu & Chigan, 2012; O. Tonguz et al., 2010; Wu et al., 2012).

3.2.2.2 Algoritmo de predicción de posición

En los protocolos de enrutamiento *broadcast* orientados al receptor, el transmisor utiliza la información que se intercambia a través del mecanismo de envío de PITs para seleccionar el siguiente salto. Por esto, es deseable que la información almacenada en la tabla de vecinos refleje la topología del vecindario. Como se mencionó anteriormente, esta topología está relacionada íntimamente con el escenario de aplicación. Por ejemplo, en escenarios tipo carretera un mismo conjunto de vehículos puede permanecer junto por un periodo más largo que en los escenarios urbanos (Rezende et al., 2011). Esto, puede permitir el uso de un algoritmo de predicción de posición con el propósito de disminuir la frecuencia de envío de PITs y por ende, la sobrecarga generada por el protocolo. Por esta razón, el algoritmo de predicción es un elemento que puede mejorar importantemente el funcionamiento del protocolo si es considerado en su diseño.

3.2.2.3 Técnica de supresión de *broadcast* (TSB)

Como se mencionó anteriormente, utilizar la técnica de inundación simple para diseminar un paquete puede ocasionar que la red se congestione rápidamente debido al conocido problema de la tormenta de *broadcast*. Por esto, con el propósito de mitigar este problema, es necesario un mecanismo que seleccione un nodo o conjunto de nodos para la diseminación del mensaje. Específicamente, en un protocolo de enrutamiento *broadcast* basado en el receptor, la TSB es la encargada de seleccionar el conjunto de vehículos más adecuados que deben retransmitir el paquete.

Aunque en principio elegir al vecino que represente mayor avance del paquete podría representar una buena opción, las difíciles condiciones de propagación

inherentes al medio de inalámbrico pueden ocasionar una significativa pérdida de paquetes. Estas condiciones están íntimamente relacionadas con el escenario de despliegue (Karedal et al., 2011; Mecklenbrauker et al., 2011). Por lo tanto, la TSB debe ser cuidadosamente diseñada considerando los aspectos específicos del escenario donde se desempeñara el algoritmo de enrutamiento para lograr atender adecuadamente el compromiso entre robustez y sobrecarga.

3.2.2.4 Estrategia de retransmisión

En los protocolos asistidos basados en el transmisor, éste elige el nodo o conjunto de nodos que debe retransmitir el mensaje antes de reenviar el mensaje. Esta decisión es tomada basada en la información almacenada en la tabla de vecinos. Debido a la topología altamente dinámica presente en las VANETs y a las difíciles condiciones del canal, la selección realizada puede ser errónea, es decir, el paquete puede no alcanzar al próximo retransmisor. Por esto, en los protocolos de este tipo es vital la implementación de un mecanismo de retransmisión para solventar los errores cometidos por la TSB y asegurar la diseminación del mensaje.

3.2.2.5 Métricas de evaluación

Es importante remarcar la diferencia del concepto de destino para el cálculo de las métricas entre los protocolos *unicast* y *broadcast*. Mientras que para los protocolos *unicast* el destino es un vehículo en particular, para los algoritmos *broadcast* el destino son todos los vehículos dentro de una zona de interés. Por esta razón, las métricas para cada tipo de protocolos se deben calcular de forma distinta. De esta manera, en el caso de la diseminación *broadcast*, la métrica de tasa de entrega de datos es obtenida contabilizando el número de vehículos dentro de la zona de relevancia que recibieron el paquete que se está diseminando. La métrica de retardo punto a punto para los protocolos enfocados a *broadcast* puede ser obtenido como el retardo desde la fuente hasta los nodos ubicados al final de la zona de relevancia. Adicionalmente, la sobrecarga generada por el protocolo es

también una métrica importante, tanto el número de retransmisiones generadas por una mala selección del siguiente salto, como el número de PITs enviados cada segundo. Así las métricas para evaluar los protocolos *broadcast* son:

- Tasa de diseminación de paquetes (TDP)
- Número de retransmisiones (NR)
- Número de PITs por segundo (PPS)
- Retardo

3.2.2 Estado del arte en algoritmos de diseminación de *broadcast* orientados al transmisor

Como se mencionó anteriormente, los algoritmos asistidos presentan menores dificultades para manejar adecuadamente el compromiso entre la sobrecarga y el número de nodos alcanzados dentro de la ZOR (Wu et al., 2012). A continuación se presenta el estado del arte relativo a los protocolos de diseminación asistida.

Los protocolos asistidos pueden agruparse en orientados al transmisor y orientados al receptor. En (O. Tonguz et al., 2010) se introduce un protocolo de diseminación asistido orientado al receptor llamado DV-CAST. Este protocolo utiliza el mecanismo de intercambio de PITs para detectar si se encuentra en un vecindario desconectado o en uno bien conectado. Si está en un vecindario bien conectado, DV-CAST utiliza TSB llamada p-persistente ponderada, la cual es presentada en (Wisitpongphan, N. et al., 2007). En caso contrario, es decir si se encuentra en un vecindario desconectado, el nodo utiliza la técnica bien conocida de guardar - llevar - avanzar ("*store-carry-forward*"). Aunque en (O. Tonguz et al., 2010) se muestra que DV-CAST obtiene buenas métricas de desempeño, es comparado solo con la técnica básica de inundación. Aún más, la frecuencia de los PITs es fija por lo que la escalabilidad del protocolo se ve afectada. Adicionalmente, DV-CAST es evaluado a través de simulación bajo un modelo de propagación que no considera las condiciones presentes en una comunicación V2V. En (Schwartz et al., 2011), los autores presentan un protocolo de

diseminación orientado al receptor llamado SRD. Al igual que DV-CAST, SRD está basado en una de las TSB introducidas en (Wisitpongphan, N. et al., 2007), i.e. 1-persistente ranurada (1PR). En esta TSB asigna una ranura de tiempo a cada vehículo que recibió la retransmisión. A mayor distancia, menor el tiempo de espera para retransmitir el mensaje. Sin embargo, dada la cercanía de los vehículos, varios de ellos pueden estar en la misma ranura de tiempo y comenzar a transmitir de manera sincronizada lo que podría ocasionar mayor número de colisiones y por lo tanto retardo o incluso pérdida del mensaje. Para mitigar esta problemática, SRD incluye la dirección relativa de los vehículos para formar las ranuras. Adicionalmente, incluye un retraso aleatorio antes de retransmitir el mensaje, ésta técnica es llamada 1PR optimizada (O1PR). SRD utiliza un mecanismo de intercambio de PITs basado en la misma TSB. El vehículo ubicado al frente del grupo transmite un PIT que es diseminado hacia todo el grupo usando O1PR. SRD muestra una mejora en el desempeño cuando es comparado con DV-CAST. Sin embargo, el mecanismo de envío de PITs puede presentar un problema importante; debido a las condiciones del canal, uno o más PITs generados por el vehículo frontal pueden perderse. Esto puede ocasionar inestabilidad en la elección de un nodo como vehículo frontal, y por lo tanto una mayor sobrecarga ya que cada PIT generado debe ser diseminado a través de toda la red. Aún más, la frecuencia de envío de PITs es fija lo que disminuye la escalabilidad del protocolo. Adicionalmente, dado que SRD es evaluado bajo condiciones de espacio libre, el impacto del medio sobre SRD es desconocido.

En (Liu & Chigan, 2012) los autores presentan un protocolo asistido orientado al receptor llamado RPB-MD. La TSB de este protocolo está basada en un temporizador que considera la dirección de movimiento y la distancia relativa respecto al retransmisor primario. A mayor distancia menor tiempo de espera para retransmitir el mensaje. Los nodos que no retransmitieron el mensaje lo retendrán con cierta probabilidad p ; la cual está relacionada con la densidad de tráfico, a mayor densidad, menor probabilidad de retener un mensaje. Estos nodos, solo

desecharan el mensaje cuando reciban un *ack* explícito enviado por el retransmisor primario. Esto sucede cuando el retransmisor primario escucha el mismo mensaje proveniente del próximo retransmisor. Si después de un tiempo T los nodos que retienen el mensaje no escuchan el *ack* explícito, entonces retransmiten el mensaje. En RPB-MD se asume que cada nodo tiene dos antenas sectoriales de 180° cada una. Cuando el nodo retransmite lo hace de manera omnidireccional, i.e. utilizando ambas antenas. Por otro lado, cuando se debe enviar un *ack* implícito solo se usa la antena sectorial dirigida en contra de la dirección de propagación del mensaje. Aunque en (Liu & Chigan, 2012) se obtienen buenas métricas de desempeño para RPB-MD, estas son obtenidas bajo un modelo de propagación que no corresponde a las condiciones encontradas en las comunicaciones V2V (Karedal et al., 2011). Por lo tanto, se desconocen los efectos del canal sobre las métricas de desempeño del protocolo. En condiciones realistas, varios de los *ack* explícitos e implícitos pueden no llegar a su destino, ocasionando así retransmisiones no deseadas y afectando el desempeño del protocolo. Aún más, en RPB-MD se asume que existe un mecanismo de intercambio de PITs para calcular la densidad de tráfico. Sin embargo, no se implementa dicho mecanismo, por lo que el efecto de la contención generada por estos en el desempeño del protocolo tampoco es conocido.

Un algoritmo orientado al receptor es presentado en (Qayyum, Viennot, & Laouiti, 2002), aquí los autores introducen un protocolo llamado retransmisión multipunto o MPR por sus siglas en inglés. En MPR, el retransmisor primario elige de entre sus vecinos un subconjunto de nodos que retransmitirán el paquete. El objetivo es que solo pertenezcan a este subconjunto el número mínimo de vecinos que provean la misma cobertura adicional que el conjunto completo. En (Qayyum et al., 2002) se muestra que MPR tiene un mejor desempeño que la inundación simple. Sin embargo, MPR no fue diseñado considerando las características específicas de las VANETs por lo que no considera la alta movilidad de los vehículos, esto puede derivar en un gran número de selecciones erróneas. Aún

más, MPR requiere que cada nodo adjunte sus vecinos a los PIT. Por lo tanto, a medida que la red se hace más densa MPR genera mayor sobrecarga afectando su escalabilidad. Con el propósito mejorar el desempeño de MPR y adaptarlo a las condiciones presentes en una VANET, en (Wu et al., 2010) se introduce un factor γ para cada uno de los enlaces en la tabla de vecinos. El objetivo de γ es calcular el área de cobertura que proporcionar un nodo en particular cuando se considera la movilidad. Como se muestra en (Wu et al., 2010), a través del factor γ es posible reducir la cantidad de selecciones erróneas realizadas por MPR. Sin embargo, tanto MPR como su versión mejorada (EMPR) no consideran en su diseño dos aspectos muy importantes: una tasa de envío de PITs adecuada y los efectos del canal inalámbrico sobre la propagación del paquete. Al igual que en los algoritmos *unicast*, después de solucionar parcialmente el problema de la diseminación *broadcast* con adaptaciones de los algoritmos propuestos para MANETs, se desarrollaron protocolos de enrutamiento ex profeso para las redes vehiculares. En (Sahoo, Wu, Sahu, & Gerla, 2009), los autores introducen un algoritmo de diseminación *broadcast* para VANETs llamado BPAB. En este protocolo, el retransmisor primario divide iterativamente el área de cobertura por 2. En cada iteración si un nodo es detectado (a través de la técnica de *blackburst* (Kuhn & De Irigon, 2007)) en el segmento exterior, entonces este segmento es la entrada para la próxima iteración. Si no se detecta un nodo en el segmento exterior entonces el segmento interior es usado como entrada para la próxima iteración. Los nodos detectados en el segmento más lejano inician un temporizador con valor aleatorio de CW donde $CW = \{0, 1, \dots, CW-1\}$. La operación de este temporizador está basado en el algoritmo de contención CSMA/CA del estándar IEEE 802.11. El nodo cuyo temporizador finaliza primero envía un paquete llamado CTB para indicar que ha sido elegido como retransmisor. Antes de iniciar el algoritmo de partición binaria el retransmisor primario envía un paquete RTB que contiene su posición geográfica y la dirección de propagación del paquete, los nodos que reciben el RTB y que están más adelante que el RP en la dirección de propagación del paquete participan en el algoritmo de partición

binaria. Existen dos problemas importantes en BPAB. El primero de estos problemas es que para un desempeño adecuado depende de que tanto el RTB como el CTB sean recibidos adecuadamente por los nodos participantes en el algoritmo de partición binaria. Sin embargo, debido a los efectos del canal inalámbrico estos paquetes pueden perderse. Por lo tanto, BPAB puede introducir una sobrecarga excesiva, así como aumentar el retardo punto a punto. Aún más, BPAB elige al nodo más lejano como retransmisor lo que en un medio de propagación difícil como el canal inalámbrico puede ocasionar un gran número de selecciones erróneas. Aunque BPAB no utiliza un mecanismo de intercambio de PITs, se incluyó en esta revisión del estado del arte debido a que la TSB utilizada requiere asistencia de un mecanismo que refleje la topología de la red, i.e. el mecanismo de *balckburst*. En (Amoroso et al., 2011), los autores introducen un algoritmo de disseminación *broadcast* llamado Oracle que propone un mecanismo para que estos nodos ocultos puedan ser considerados como retransmisores potenciales. Para esto, Oracle construye tres listas a través de los PITs intercambiados periódicamente. Una lista de nodos a los que escucha, una lista de nodos que lo escuchan y una más para registrar las parejas de nodos entre los que se encuentra geográficamente ubicado. En cada intervalo correspondiente los nodos incluyen, además de la información topológica, las tres listas mencionadas. Incluir estas listas puede ocasionar un problema importante de escalabilidad cuando la densidad de vehículos aumenta. Amoroso et al. hacen énfasis en los efectos que ocasiona el canal radio sobre la propagación de los mensajes. Sin embargo, el algoritmo no fue evaluado considerando un modelo de canal que reflejara las condiciones presentes en el canal radio de una comunicación vehículo a vehículo por lo que no se conocen los efectos del canal radio sobre la solución propuesta en (Amoroso et al., 2011). En (Wu et al., 2012) los autores presentan un protocolo de disseminación *broadcast* asistido basado en el transmisor desarrollado ex profeso para redes vehiculares. Este protocolo es llamado *fuzzy broadcast* (FUZZBR). Comparado con los protocolos previamente descritos, FUZZBR ofrece algunas ventajas como el tomar en cuenta las condiciones del canal y la movilidad

de sus vecinos para elegir el próximo salto. Considerar estos parámetros es importante, porque ayuda a disminuir la cantidad de selecciones erróneas y por ende disminuye el retardo punto a punto y la sobrecarga originada por el protocolo. Adicionalmente, FUZZBR implementa un acuse de recibo (*ack*) implícito, i.e. el retransmisor primario considera el mensaje retransmitido por el siguiente salto como confirmación de que el mensaje fue recibido. El *ack* implícito permite disminuir la sobrecarga de control generada por el protocolo, mejorando la escalabilidad de FUZZBR. Estas características, permiten a FUZZBR adaptarse mejor a escenarios vehiculares. Sin embargo, una problemática presente en FUZZBR es la probabilidad de realizar una selección de siguiente salto correcta, depende directamente de la frecuencia con que se actualiza la información en la tabla de vecinos. Por lo tanto, la sobrecarga de control generada por los PITs puede afectar la escalabilidad del protocolo. A pesar de esta desventaja, parece ser que FUZZBR supera varios de los problemas que presentan los protocolos mencionados previamente. De hecho, en (Wu et al., 2012) se obtuvieron diferentes métricas para evaluar el desempeño de FUZZBR, las cuales muestran que este protocolo funciona mejor que un protocolo no asistido basado en probabilidad (Wisitpongphan, N. et al., 2007) y que uno de los protocolos asistidos basados en el receptor más recientes (Wu et al., 2010). En (Kihl, Sichitiu, Ekeroth, & Rozenberg, 2007) se presenta un algoritmo de enrutamiento que explora la posibilidad de acotar el radio de cobertura a un valor menos optimista que el radio de cobertura nominal. Sin embargo, no se toman en cuenta aspectos importantes de la propagación de un mensaje en las comunicaciones V2V como la dirección relativa de los vehículos. Además, este protocolo es evaluado bajo condiciones de propagación que no corresponden a las encontradas en los escenarios de comunicaciones V2V. Aún más, dado que ROVER utiliza el mecanismo de inundación para la etapa de descubrimiento de ruta, no aborda el problema de la tormenta de broadcast, lo que disminuye de manera importante su eficiencia respecto a la sobrecarga introducida.

Tabla 7. Protocolos de difusión para redes vehiculares y su respectiva TSB

Protocolo	TSB	Orientado A	Canal
RPB-MD	Temporizador	Rx	2-Rayos
MPR	Distancia	Tx	NR
EMPR	Distancia	Tx	2-Ratos
BPAB	Temporizador	Tx	NR
ORACLE	Distancia	Tx	2-Rayos
FUZZBR	Dist/RSSI/movilidad	Tx	Nakagami
DV-CAST	Distancia	Rx	Ricean
SRD	Temporizador	Rx	Espacio Libre
ROVER	NA	Tx	Rayleigh

Una característica común que se puede observar en DV-CAST, SRD, RPB-MD, MPR, EMPR, BPAB, ORACLE ROVER y FUZZBR es que la mayor parte de ellos no consideran en su diseño un modelo de propagación desarrollado específicamente para escenarios vehiculares. De hecho, el desempeño de la mayoría fue evaluado considerando un modelo de propagación ideal o uno no desarrollado específicamente para comunicaciones vehículo a vehículo (V2V). Aunque esta consideración es un buen inicio para el diseño y la evaluación de un algoritmo de diseminación *broadcast*. Trabajos recientes muestran que los efectos del canal en las comunicaciones V2V pueden ser muy severos (Acosta-Marum & Ingram, 2007b; Karedal et al., 2011). Por lo tanto es de suma importancia considerar los efectos de la propagación en las comunicaciones V2V al diseñar y evaluar el desempeño de un nuevo algoritmo de diseminación *broadcast*. Adicionalmente, aunque DV-CAST, SRD y RPB-MD obtienen buenas métricas de desempeño al ser evaluados, de acuerdo con (Wu et al., 2012) los protocolos orientados al receptor no pueden manejar adecuadamente el compromiso entre retransmisiones redundantes y robustez. Aunque FUZZBR no considera un modelo de canal desarrollado ex profeso para comunicaciones V2V en su evaluación, ni incluye una estrategia adaptativa para el intercambio de PITs; después del análisis hecho sobre los protocolos encontrados en la literatura,

parece ser que FUZZBR es el protocolo que considera el mayor número de las problemáticas encontradas en la disseminación de mensajes *broadcast* sobre una VANET. La Tabla 7 muestra un resumen de las características más importantes de cada uno de los protocolos descritos en esta sección.

Basado en la discusión previa, se puede establecer que existen tres cuestiones principales que deben ser atendidas cuando se diseña un nuevo protocolo de disseminación *broadcast*: el diseño de una estrategia de supresión de *broadcast* que aborde adecuadamente el compromiso entre la robustez del protocolo y la sobrecarga generada por este. Adicionalmente, con el propósito de mejorar la escalabilidad y robustez del protocolo es necesaria la inclusión de un mecanismo adaptativo para la frecuencia de los PITs. Finalmente, es muy importante tomar en cuenta los efectos del canal al momento de diseñar un algoritmo de disseminación. Así como también, incluir en la evaluación de la propuesta un modelo de propagación comunicaciones V2V, como los presentados en (Acosta-Marum & Ingram, 2007b; Karedal et al., 2011).

3.3 Resumen

En este capítulo se presentó una revisión de la literatura de las propuestas de enrutamiento dividida en dos partes. La primera parte presenta una discusión sobre el estado del arte en los protocolos de enrutamiento de la cual se puede establecer que hay dos puntos importantes a tomar en cuenta al diseñar un nuevo algoritmo de enrutamiento para redes vehiculares desplegadas en carreteras: una evaluación en un escenario que refleje las condiciones presentes en este tipo de redes; y un diseño que no dependa de infraestructura para que pueda adaptarse más fácilmente a un escenario tipo carretera.

La segunda parte de este capítulo presenta el estado del arte en los protocolos de disseminación existentes. De la discusión presentada se puede establecer que los protocolos enfocados al transmisor pueden abordar de una mejor manera el compromiso existente entre la robustez del protocolo y la sobrecarga generada por

este. Adicionalmente, dado que este tipo de protocolos requiere un mecanismo de intercambio de PITs, es importante también tomar en cuenta el compromiso existente entre la sobrecarga generada por este intercambio y la precisión de la información en la tabla de vecinos a un salto.

Capítulo 4

Diseño y evaluación de un algoritmo de encaminamiento *unicast* para VANETs enfocado a escenarios tipo carretera.

4.1 Introducción

Como se mencionó en el capítulo 3, para obtener un desempeño satisfactorio del protocolo de enrutamiento, se deben considerar las restricciones impuestas por el canal inalámbrico desde la etapa de diseño del algoritmo. Por lo tanto, los diferentes módulos del algoritmo (i.e. frecuencia de PITs, el algoritmo de selección del siguiente salto, el servicio de localización) deberían ser diseñados considerando las restricciones impuestas por el escenario de despliegue al cual se enfoca el protocolo. En las siguientes subsecciones se presentan los diferentes módulos que integran el protocolo de enrutamiento *unicast* propuesto en este trabajo de investigación para escenarios de despliegue de VANETs en carreteras. A dicho algoritmo se le decidió llamar enrutamiento independiente basado en posición, FPBR por sus siglas en inglés.

Antes de realizar la descripción de los componentes de FPBR, es importante mencionar que para su desarrollo se asumió que los vehículos están equipados con un sistema que les provea su posición, como el sistema de posicionamiento global (GPS), un transceptor de radio IEEE 802.11a o un transceptor IEEE 802.11p habilitado para una sola clase de servicio. Se considera que el tipo de transceptor usado por los vehículos dentro del escenario es homogéneo (IEEE 802.11a o bien IEEE 802.11p). Adicionalmente, se asume también que existe una estrategia distribuida para la estimación de la densidad de tráfico como las propuestas presentadas en (Garelli, Casetti, Chiasserini, & Fiore, 2011) y (S. Panichpapiboon & Pattara-atikom, 2008).

Una vez establecidas las suposiciones generales respecto al equipamiento de los vehículos, en las siguientes secciones se describirá el mecanismo con el cual FPBR busca mitigar los problemas impuestos por las condiciones de propagación presentes en escenarios tipo carretera.

4.1 Algoritmo de selección del siguiente salto

El algoritmo de selección es importante porque elige el siguiente nodo que se encargará de retransmitir un paquete en dirección del destino. La mayoría de los protocolos de enrutamiento enfocados a VANETs consideran en el diseño de la estrategia de selección que los paquetes pueden alcanzar la frontera del radio de cobertura nominal. Sin embargo, de acuerdo a la Ecuación (1) originalmente introducida en la Sección 2.3.1.1, esto no se cumple en las comunicaciones vehículo a vehículo en escenarios tipo carretera. Es importante mencionar que aunque en (Daeinabi, Pour Rahbar, & Khademzadeh, 2011) los autores presentan un algoritmo de ajuste del rango de transmisión llamado AATR, este basado en la densidad de vehículos calculada a través de los PITs recibidos y no en los efectos del canal radio. Por lo tanto, la problemática de elegir un siguiente salto fuera del alcance del transceptor de radio persiste.

Vale la pena recordar que en la Ecuación (1), la dirección relativa de los vehículos es muy importante en las pérdidas por propagación. Ésta es introducida a través del término ζ que puede tomar diferentes valores. Específicamente, ζ es una variable definida de acuerdo a la dirección relativa de los vehículos. Esto es, ζ adquiere el valor de 1 para vehículos viajando en direcciones opuestas y alejándose; -1 para vehículos viajando en direcciones opuestas y acercándose; y 0 para vehículos viajando en convoy. Por lo tanto, si se selecciona un nodo en el radio de cobertura nominal que está alejándose en dirección opuesta, es probable que el paquete no lo alcance debido a que las pérdidas por propagación son más grandes de lo esperado, i.e. $\zeta = 1$. Una forma de evitar esto sería realizando un ajuste al alcance de radio cuando se realiza la selección del siguiente nodo que

debe retransmitir el mensaje. El realizar este ajuste y como implementarlo es una de las principales contribuciones de este trabajo por lo tanto, antes de describir los módulos del protocolo de enrutamiento, describimos el mecanismo de selección del siguiente salto. El cual está conformado por el algoritmo de predicción y el algoritmo de selección.

4.1.1 Algoritmo de predicción

Cuando el algoritmo de enrutamiento necesita enviar o retransmitir un paquete, el AP debe corregir el error que existe en la posición de los vehículos almacenada en la tabla de vecinos. Así, cuando se debe seleccionar el siguiente salto, el AP es invocado antes de hacer la selección. El funcionamiento del AP implementado en FPBR se describe en los siguientes párrafos:

- 1) El número de entradas en la tabla de vecinos a un salto es actualizado de la siguiente manera: si el tiempo desde que se recibió el último PIT de una entrada en particular es mayor a dos veces la tasa de envío de PITs, entonces ésta es borrada de la tabla de vecinos a un salto.
- 2) Después de realizar el paso 1, la posición de todos los vecinos es actualizada a través de la Ecuación (5):

$$P_N = P_{act} + (\hat{v} * dt + \hat{acc} * dt^2) \quad (5)$$

Donde P_N es la nueva posición calculada; P_{act} es la posición almacenada en la tabla de vecinos; \hat{v} es la velocidad almacenada en la tabla de vecinos; \hat{acc} es el vector de aceleración almacenada en la tabla de vecinos; y dt es el tiempo que ha permanecido la entrada almacenada en la tabla de vecinos.

- 3) La tabla de vecinos actualizada se entrega al algoritmo de selección del siguiente salto.

4.1.2 Algoritmo de selección MFWAR

FPBR selecciona el siguiente salto prediciendo la posición de cada vecino con el AP para después agrupar a los vehículos en tres diferentes conjuntos. Estos, grupos son definidos basándose en la dirección relativa de los vecinos de la siguiente manera: V_s es el grupo de vehículos viajando en direcciones opuestas y alejándose; V_a es el grupo de vehículos viajando en direcciones opuestas y acercándose; y V_c es el grupo de vehículos viajando en la misma dirección. La selección final es realizada a través del mecanismo llamado el más adelantado dentro del radio acotado (“*most forward within adjusted radio*” o MFWAR) el cual es una de las contribuciones de este trabajo. El radio de cobertura nominal es ajustado considerando las condiciones de propagación en escenarios tipo carretera. Dichas condiciones son modeladas por la Ecuación (1) introducida en (Karedal et al., 2011).

La Ecuación (1) muestra que es de suma importancia considerar la dirección relativa de los vecinos cuando el algoritmo de enrutamiento debe seleccionar el siguiente salto. De acuerdo a la Ecuación (1), los vehículos que viaja en direcciones opuestas y que se acercan tienen una probabilidad mayor de una recepción exitosa, esto debido a que las pérdidas por propagación son menores (i.e. toma el valor de $\zeta = -1$). Cuando los vehículos se mueven en direcciones opuestas y se alejan, la probabilidad de no entregar un paquete exitosamente se incrementa debido a que las pérdidas por propagación son mayores (i.e. toma el valor de $\zeta = 1$). Si los vehículos viajan en convoy, entonces no hay incremento o decremento relativo de las pérdidas por propagación (i.e. toma el valor de $\zeta = 0$). Es importante resaltar que esto no implica que no exista el efecto del desvanecimiento lento (*shadowing*) puesto que sigue siendo considerando en la Ecuación (1).

De la Ecuación (1) también se puede inferir que considerar el radio nominal en el proceso de selección puede ser una mala decisión. Esto debido a que el

desvanecimiento lento (*shadowing*) puede generar en un número significativo de pérdidas de paquetes cerca del borde del radio de cobertura nominal. Con el propósito de disminuir la probabilidad de perder un paquete debido a seleccionar como siguiente retransmisor a un vehículo fuera del alcance, se modificó el mecanismo llamado más lejano dentro del radio de cobertura (“most forward within radio” o MFR), (para ver una descripción de este mecanismo el lector puede referirse a (Behnad & Nader-Esfahani, 2011)). La modificación realizada consiste en agregar tres factores dinámicos llamados β_a , β_c y β_s . Estos factores dinámicos son usados para escalar el radio de cobertura nominal a un valor más adecuado para cada conjunto de vehículos V_a , V_c y V_s respectivamente. Este nuevo mecanismo de disseminación es llamado el más adelantado dentro del radio acotado (“most forward within adjusted radio” o MFWAR).

Con el propósito de clarificar el uso de los factores dinámicos se expone el siguiente ejemplo: asuma que el nodo T_1 en la Figura 9a tiene un radio de cobertura nominal R_n , y que β_s y β_c son los factores de escalamiento de los conjuntos V_s y V_c respectivamente. Adicionalmente, las siguientes asunciones son hechas:

- El nodo T_1 tiene datos para enviar más allá de su radio de cobertura nominal.
- El nodo R_3 se está alejando de T_1 y por lo tanto pertenece al conjunto V_c .
- Los nodos R_1 y R_3 viajan en la misma dirección que T_1 y pertenecen al conjunto V_c .

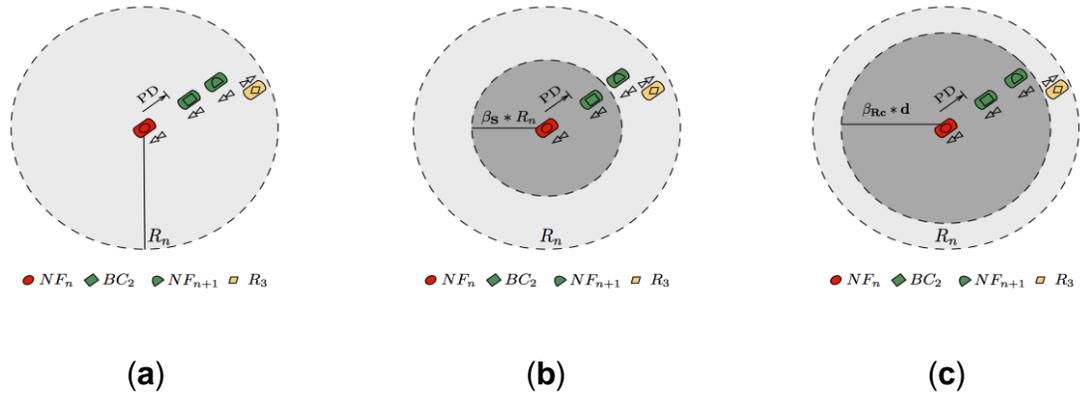


Figura 9. Uso de los factores dinámicos β_s y β_c para ajustar el radio de cobertura nominal, R_n , para vehículos que pertenecen a los conjuntos V_s and V_c . (a) Radio de cobertura nominal R_n ; (b) Radio de cobertura ajustado $\beta_s * R_n$ para vehículos viajando en dirección opuesta y alejándose (conjunto V_s). (c) Radio de cobertura ajustado $\beta_c * R_n$ para vehículos viajando en la misma dirección (conjunto V_c).

En este ejemplo, si se considerara que la señal se propaga en el espacio libre entonces R_3 sería seleccionado como el nodo retransmisor. Esto, debido a que R_3 está dentro del radio de cobertura nominal de T_1 y es el nodo más alejado (ver Figura 9(a)). Sin embargo, esta puede no ser la mejor opción si se consideran los efectos de la propagación en un escenario tipo carretera como lo indica la Ecuación (1). Esto, debido a que T_1 y R_3 se están moviendo en direcciones opuestas y R_3 está en la frontera del radio de cobertura nominal. Así, el mecanismo MFWAR ajusta el radio de cobertura nominal de T_1 utilizando el factor β_s . De esta manera, el radio de cobertura nominal de T_1 es escalado a un nuevo valor $\beta_s * R_n$ y R_3 no es seleccionado debido a que se ubica fuera del radio de cobertura ajustado (ver Figura 9(b)). Por otro lado, R_1 y R_2 son vehículos que pertenecen al conjunto V_c , por lo tanto el mecanismo MFWAR ajusta el radio de cobertura para estos nodos a $\beta_c * R_n$. Note que con el propósito de disminuir la probabilidad de perder un paquete, se evita seleccionar nodos que estén cerca de la frontera del radio de cobertura nominal, por lo tanto, $B_c < 1$. Aunque R_1 y R_2 están ubicados dentro del radio de cobertura ajustado $\beta_c * R_n$, R_2 es el vehículo más adelantado (ver Figura 9(c)), por lo tanto, es elegido como nodo retransmisor (FN_{n+1}).

4.2 Mecanismo de intercambio de paquete de información topológica

Tal como se describió en el capítulo 3, en los protocolos basados en posición, los nodos eligen el siguiente salto para enviar paquetes de información o de control basados en la información previamente intercambiada con sus vecinos. Esta información es intercambiada utilizando los paquetes de información topológica (PITs). Así, existe un compromiso entre la sobrecarga causada por la emisión de los PITs y la precisión de la información en la tabla de vecinos.

La función de los PITs es reflejar la topología de red de un grupo de vehículos. En este contexto, es importante recordar que la topología de red depende de la movilidad de los vehículos y ésta a su vez del escenario de despliegue. Consecuentemente el escenario de despliegue, urbano o carretera, tiene un rol fundamental para determinar la frecuencia con que se envían los PITs.

Es importante mencionar que en un escenario tipo carretera el mismo conjunto de vehículos puede estar dentro del vecindario de un vehículo por mayor tiempo que en un escenario urbano (Antnio Fonseca & Vazao, 2012a). Por esto, puede ser viable utilizar una frecuencia baja de emisión de PITs. Sin embargo, esto ocasiona una mayor diferencia entre la posición almacenada en la tabla de vecinos y la posición real. Con el propósito de solucionar esta problemática, en FPBR se implementó un AP. Este AP permite obtener una tasa de envío de PITs de 0.4 cuando se considera una densidad de libre flujo (i.e. los vehículos alcanzan la máxima velocidad permitida (M. Treiber, Hennecke, & Helbing, 2000; Wang, Ni, Chen, & Li, 2011)), y una tasa de 0.3 para las otras densidades.

4.3 Servicio de localización

El protocolo FPBR invoca al servicio de localización (SL) cuando el algoritmo de enrutamiento recibe un paquete dirigido a un vehículo con una dirección geográfica desconocida. En FPBR, el SL utiliza paquetes *broadcast* con el propósito de encontrar la dirección buscada. Por lo tanto, para mitigar el problema

de la tormenta de *broadcast* en FPBR se implementa una técnica de supresión de *broadcast*. Adicionalmente, considerando que las condiciones de propagación pueden llegar a ser muy severas, se ha implementado también una estrategia de redundancia con el propósito de mejorar la robustez de la propuesta. El SL propuesto se explica con mayor detalle en las siguientes subsecciones (4.4.1 y 4.4.2).

4.3.1 Descubrimiento de posición

En el procedimiento de descubrimiento de posición (DP) se consideran tres tipos de nodos: nodo fuente, nodo retransmisor y nodo destino. El nombre de estos nodos básicamente describe su rol en el proceso del descubrimiento. Los nodos fuente son los nodos que tienen datos para enviar. Los nodos retransmisores son vehículos ubicados a lo largo de la ruta de los datos. Finalmente, los nodos destino son los vehículos hacia donde se envían los datos.

Si un nodo fuente necesita enviar datos, y la posición geográfica del destino es desconocida, entonces el nodo fuente inicia el DP enviando un paquete *broadcast* de requisición de petición (LREQ) utilizado para encontrar la posición geográfica del destino. Es importante mencionar que, antes de enviar este paquete un nodo (fuente o retransmisor) selecciona un conjunto de vehículos que fungirán como retransmisores. Este conjunto es conformado a través del algoritmo de selección presentado en la sección 4.1. Si el vehículo es el nodo, entonces el conjunto de nodos retransmisores que se incluye en el paquete LREQ debe incluir al menos un nodo por cada dirección. Si el vehículo es un nodo retransmisor ubicado en una intersección, entonces el conjunto incluye al menos un vehículo en cada dirección excepto de la que proviene el mensaje. De otra manera, el conjunto de retransmisores solo incluye al menos un vehículo en la dirección de propagación del mensaje.

Una vez que el paquete LREQ es recibido por el destino, éste espera un tiempo equivalente a dos veces el tiempo de propagación (τ) antes de enviar el paquete

de respuesta (LREP). Este tiempo de espera es introducido con el propósito de evitar posibles colisiones con otros paquetes LREQ que podrían arribar por otros caminos. Así, después de 2τ segundos, el nodo destino genera un LREP que contiene su posición geográfica y vector de velocidad. El paquete LREP es diseminado hacia el nodo fuente usando el mismo algoritmo que se utilizó para la diseminación del LREQ. Cuando el paquete LREP es recibido por la fuente, entonces el paquete de datos es enviado hacia la posición geográfica del destino utilizando el mecanismo MFWAR. Con el propósito de evitar colisiones entre los paquetes de DP y los PITs, cada nodo que escucha un paquete de DP retrasa τ segundos el envío del PIT programado. Esto es posible debido a que los paquetes de DP (LREQ y LREP) son enviados como paquetes *broadcast*.

4.3.2 Estrategia de redundancia

Como se mencionó previamente, el objetivo de considerar las restricciones impuestas por el canal radio en el mecanismo de selección MFWAR es reducir el número de selecciones erróneas de siguiente salto para disminuir la pérdida de paquetes. Sin embargo, en ocasiones un paquete de descubrimiento puede no alcanzar el retransmisor primario.

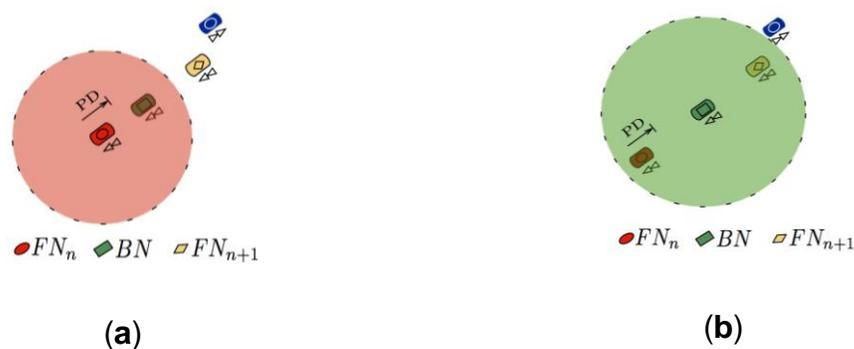


Figura 10. Ejemplo de la estrategia de redundancia implementada en FPBR. (a) El paquete de descubrimiento llega al nodo BN pero no alcanza al nodo FN_{n+1} ; (b) El nodo BN retransmite el paquete de descubrimiento dado que el paquete de descubrimiento original no alcanzó al nodo FN_{n+1} .

Lo anterior puede ser debido a unas pérdidas por propagación más severas de lo esperado o por una predicción incorrecta hecha por el AP (ver Figura 10(a)). De

esta manera, si el paquete de descubrimiento enviado por el transmisor actual no alcanza al retransmisor primario, entonces FPBR utiliza la estrategia de redundancia que consiste en utilizar un nodo de respaldo BN ubicado entre el transmisor y el retransmisor primario. La tarea del BN es transmitir el paquete de descubrimiento en caso de no escuchar el paquete proveniente del retransmisor primario con el propósito de continuar con el proceso de descubrimiento de posición (ver Figura 10(b)). Así, es importante resaltar que el nodo BN debe estar ubicado entre el transmisor actual (llamado FN_n) y el retransmisor primario (llamado FN_{n+1}) con el propósito de incrementar la probabilidad de recepción. Adicionalmente al nodo de respaldo, es necesario un mecanismo de acuse de recibo para implementar la estrategia de redundancia. Sin embargo, en los estándares IEEE 802.11a e IEEE 802.11p la capa MAC no contempla un mecanismo de acuse de recibo para paquetes *broadcast*. Por esto, en FPBR se implementa un mecanismo de acuse de recibo implícito. Este mecanismo y el proceso de selección del nodo de respaldo son explicados a continuación.



Figura 11. Ejemplo del mecanismo de acuse de recibo implícito implementado en FPBR. (a) El retransmisor primario recibe exitosamente el paquete de descubrimiento; (b) El nodo BN recibe exitosamente el acuse de recibo implícito proveniente de FN_{n+1} .

4.3.2.1 Mecanismo de acuse de recibo implícito

Si el nodo de retransmisor primario, FN_{n+1} , recibe un paquete de descubrimiento (ver Figura 11(a)), entonces retransmite este paquete (con el conjunto de retransmisores actualizado) hacia el nuevo retransmisor primario (e.g. FN_{n+2}).

Dado que BN está ubicado entre el transmisor actual, FN_n , y el retransmisor primario, FN_{n+1} , BN debería ser capaz de escuchar la retransmisión del paquete de descubrimiento proveniente de FN_{n+1} (ver Figura 11(b)). Esta característica es utilizada en FPBR como un acuse de recibo implícito. Así, si un nodo cuyo ID está listado en el paquete de descubrimiento que recibe, espera por 2τ segundos. Si después de este tiempo, el nodo BN no detecta la retransmisión del mismo paquete de descubrimiento proveniente del nodo FN_{n+1} , entonces el nodo BN retransmite el paquete de descubrimiento original hacia el nodo FN_{n+1} . Es importante resaltar que debido a que en FPBR se utiliza un mecanismo de acuse de recibo implícito, no se requieren paquetes de control adicionales. De esta manera, el mecanismo de acuse de recibo en FPBR no contribuye a la sobrecarga de enrutamiento.

4.3.2.2 Selección del nodo de respaldo (BN)

Como se mencionó previamente, la tarea específica del nodo BN es retransmitir el paquete de descubrimiento original si el nodo FN_{n+1} no escucha, y por lo tanto, no retransmite el paquete respectivo. En FPBR, el BN es seleccionado de tal manera que este ubicado entre los nodos FN_n y FN_{n+1} . Aunque seleccionar un BN ubicado a la mitad entre el transmisor original y el retransmisor primario seleccionado puede ser un buen punto de partida, esta selección no considera la dirección de los vehículos y el consecuente incremento (decremento de las pérdidas por propagación). Así, FPBR utiliza el mecanismo MFWAR para seleccionar el nodo de respaldo. Sin embargo, para la selección del nodo BN, se asume que el radio de cobertura nominal es igual a la distancia entre FN_n y FN_{n+1} . Esta distancia será referenciada más adelante como $d(FN_n, FN_{n+1})$.

Para la selección del nodo BN utilizando MFWAR, los vehículos son agrupados en tres conjuntos basados en su dirección relativa con el transmisor original. V_{R_a} , V_{R_c} y V_{R_s} . Adicionalmente, se consideran tres factores dinámicos β_{R_a} , β_{R_c} y β_{R_s} . Estos factores son utilizados para ajustar $d(FN_n, FN_{n+1})$ a través de MFWAR. Si no se

logra encontrar un BN dentro del radio de cobertura requerido, entonces el transmisor actual se elige a sí mismo como BN. Como se mencionó previamente, después de seleccionar al nodo BN , se incluye su ID en el campo correspondiente del paquete de descubrimiento.

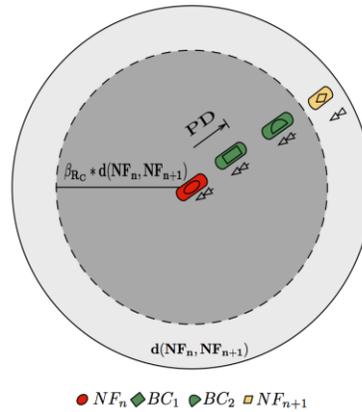


Figura 12. Selección del nodo de respaldo (BN) a través del mecanismo MFWAR. El nodo BC_2 es seleccionado como BN debido a que es el más cercano a la frontera de la distancia acotada $\beta_{Rc} * d(FN_n, FN_{n+1})$

Un ejemplo de la selección del nodo BN utilizando el mecanismo MFWAR es esquematizado en la Figura 12. Asuma que la distancia desde el transmisor original, FN_n , y el retransmisor primario, FN_{n+1} , es $d(FN_n, FN_{n+1})$. Debido a que ambos candidatos a nodos de respaldo en la Figura 12 se están moviendo en la misma dirección que FN_n , se utiliza el factor β_{Rc} para ajustar la distancia $d(FN_n, FN_{n+1})$. En la Figura el nodo BC_2 está ubicado más cerca de la frontera de la distancia ajustada que el nodo BC_1 . Por lo tanto, en este ejemplo se selecciona al nodo BC_2 como BN .

4.4 Diseminación de datos

Después de que el nodo fuente recibe la ubicación geográfica proveniente del destino, los datos son enviados hacia éste usando el mecanismo MFWAR. Es importante mencionar que como la posición geográfica es incluida en el paquete de datos, cada nodo retransmisor decide independientemente el mejor siguiente

salto para el paquete. Aún más, debido a que cada nodo cuenta con un mapa digitalizado, se puede utilizar una técnica basada en puntos anclados, como en (Jerbi et al., 2009; Naumov & Gross, 2007), donde exista una intersección. En FPBR, se asume que el mecanismo RTS/CTS es deshabilitado para la diseminación de datos. Esta asunción, disminuye el retardo del paquete de datos y la sobrecarga de enrutamiento. Aún más, implementar el mecanismo de RTS/CTS implica la transmisión de varios paquetes de control antes de enviar el paquete de datos. Un inconveniente con esta estrategia es que uno o más de estos paquetes de control pueden perderse debido a las restricciones impuestas por el canal radio en escenarios tipo carretera. Esto puede derivar en una significativa baja en el desempeño, debido a que se deben enviar por lo menos 4 paquetes (RTS + CTS + DATA + ACK) de control por cada paquete de datos.

4.5 Máquina de estados y diagramas de flujo de FPBR

Con el propósito de explicar con mayor claridad la interacción entre los diferentes módulos de FPBR (i.e. Mecanismo de PITS, Servicio de descubrimiento y envío de datos) un diagrama de flujo de cada uno de los tres módulos es presentado en la Figura 13.

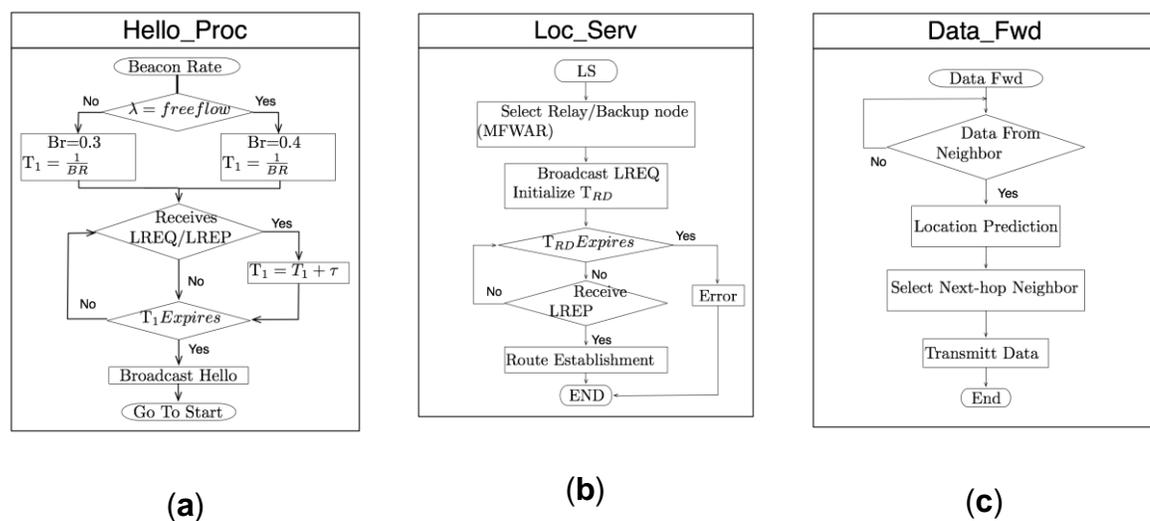


Figura 13. Diagramas de flujo de los principales procesos del protocolo FPBR: (a) el mecanismo de PITS; (b) El servicio de descubrimiento y (c) el servicio de diseminación de datos.

La Figura 13(a) presenta el diagrama de flujo del mecanismo de PITs llamado Hello_proc, este módulo está encargado del envío de los PITs. El periodo de espera, T_1 , utilizado en este módulo es calculado de acuerdo a la tasa de envío de PITs mencionados en la sección 4.2. El diagrama de flujo del servicio de descubrimiento es mostrado en la Figura 13(b) (llamado Loc_Serv). Este módulo está encargado de desempeñar los procedimientos descritos en la sección. Finalmente, el diagrama de flujo de la diseminación de datos presentada en la sección es esquematizada en la Figura 13(c) (Llamada Data_Fwd).

La interacción entre los diferentes módulos de FPBR es controlada a través la máquina de estados, como se muestra en la Figura 14. Cada transición de la máquina de estados está en el formato condición/procedimiento. Un módulo específico de la Figura 14 es lanzado cuando la condición correspondiente de la máquina de estados es cumplida. La condición Hello_timer se satisface cuando concluye el periodo de espera T_1 , entonces se invoca el procedimiento Hello_proc. Si la capa de red recibe un paquete que proviene de la de aplicación, entonces la condición App_pkt se cumple y el módulo Loc_Serv es invocado. Finalmente, si un nodo recibe un paquete de datos enviado por un nodo vecino, la condición Nb_App_pkt se satisface y el módulo Fwd_Data es invocado.

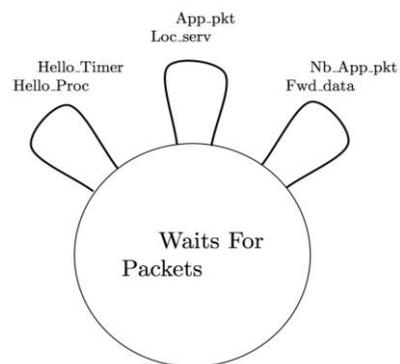


Figura 14. Máquina de estados que controla la interacción entre los diferentes módulos del protocolo FPBR

4.6 Resumen

En este capítulo se presentó la descripción de los módulos que conforman el protocolo de enrutamiento FPBR propuesto en este trabajo de tesis. Uno de los principales elementos es el mecanismo de selección llamado MFWAR, el cual ajusta el radio de cobertura nominal a un valor más adecuado de acuerdo a las condiciones presentes en los escenarios tipo carretera. Esto con el propósito de aumentar la probabilidad de que el paquete sea recibido por el siguiente salto. De esta manera, la sobrecarga generada por las retransmisiones puede verse disminuida, al igual que el retardo.

El servicio de localización se diseñó con base en MFWAR y utilizando paquetes tipo *broadcast*. Debido a que pueden existir pérdidas mayores a las esperadas o a que un vehículo puede salir del radio de cobertura de manera inesperada, y por lo tanto, el paquete puede perderse. Es importante mencionar que en el estándar IEEE 802.11 no se contempla un mecanismo de retransmisión para los paquetes tipo *broadcast*. Por lo tanto, FPBR incluye un mecanismo de retransmisión para los paquetes *broadcast*. Este mecanismo selecciona un nodo de respaldo entre el retransmisor original y el siguiente salto. Si el nodo de respaldo no escucha la retransmisión proveniente del siguiente salto entonces retransmite el paquete. Es decir, se utiliza el mismo paquete del servicio de localización como un acuse de recibo. La implementación de este acuse de recibo implícito, permite conservar en un nivel bajo la sobrecarga introducido por el protocolo.

Una vez que la posición del destino es conocida, el servicio de disseminación de datos se encarga de disseminar los datos en dirección al destino. Esta disseminación es hecha tomando como base el mecanismo de selección MFWAR.

Capítulo 5

Evaluación del desempeño de FPBR

El desempeño de FPBR es evaluado en un escenario tipo carretera, además, es comparado con el desempeño de uno de los protocolos de enrutamiento *unicast* líderes en el estado del arte, DDOR. En este capítulo se presentan las diferentes métricas de desempeño obtenidas tanto para FPBR como para DDOR. Particularmente, métricas como tasa de entrega de paquetes, retardo punto a punto, retardo por salto, sobrecarga de enrutamiento (red y MAC) y número de saltos fueron obtenidas para ambos protocolos a través de la cama de pruebas implementada en el simulador OPNET modeler. En la cama de pruebas implementada se consideraron dos diferentes modelos de propagación: el modelo de espacio libre y el modelo de propagación para comunicaciones V2V en escenarios tipo carretera introducido en (Karedal et al., 2011). Adicionalmente, la implementación del estándar IEEE 802.11a de OPNET fue modificada para adaptar su funcionamiento al de las capas PHY/MAC del estándar IEEE 802.11p como se describirá más adelante en la sección 5.2.

5.1 Protocolo de referencia

En este trabajo se utilizó como referencia para evaluar el desempeño de FPBR el protocolo de enrutamiento llamado DDOR. Este protocolo fue seleccionado debido a que fue diseñado ex profeso para VANETs desplegadas en escenarios tipo carretera. Además, en (Sahu et al., 2010) se muestra que DDOR presenta un mejor desempeño que el obtenido para AODV, DSR, y GPSR. Aún más, DDOR incluye características diseñadas específicamente para manejar algunas de las restricciones impuestas por los escenarios tipo carretera, las cuales no son incluidas por otros protocolos diseñados para VANETs como: GPSR-L, LORA-CBF y CAR.

5.2 Estándar IEEE 802.11p

Hasta la fecha de terminación de este trabajo, no estaba disponible un modelo específico del estándar IEEE 802.11p en OPNET. Pero, debido a la relevancia de este estándar en el contexto de las comunicaciones V2V, para la cama de pruebas implementada se utilizó una adaptación del modelo IEEE 802.11a de tal manera que los parámetros de las capas PHY/MAC correspondieran a los encontrados en el estándar IEEE 802.11p. Una adaptación similar fue utilizada antes en (Iqbal, Wang, Xu, Eljack, & Mohammad, 2011) para la evaluación de AODV y DSR en VANETs utilizando transceptores de radio IEEE 802.11p.

Como se mencionó, la capa MAC en IEEE 802.11p adoptó el mecanismo EDCA de IEEE 802.11e. Este mecanismo define 4 diferentes clases de tráfico con diferentes parámetros de función de coordinación distribuida (DCF)-CSMA/CA (IEEE, 2010a; Iqbal et al., 2011; Misić, Badawy, & Misić, 2011). En este trabajo, los parámetros IEEE 802.11p DCF correspondientes al tráfico de mejor esfuerzo sobre canales de servicio (vea (Misić et al., 2011)) fueron utilizados para modificar el modelo de IEEE 802.11a incluido en OPNET. Así, los valores máximos y mínimos de la ventana de contención y el tiempo de ranura fueron ajustados a los valores de tráfico de mejor esfuerzo (*best effort*) de IEEE 802.11p. De manera similar, el valor del DIFS fue reemplazado con el valor del AIFS correspondiente. Respecto a la adaptación de la capa PHY, el ancho de banda y la frecuencia de operación del modelo de IEEE 802.11a de OPNET fueron ajustados a 10MHz y 5.88GHz respectivamente, como define el estándar IEEE 802.11p. En el resto de este trabajo el modelo modificado será referido como el modelo IEEE 802.11 a/p.

5.3 Escenario de evaluación

El desempeño de ambos protocolos fue evaluado considerando un escenario tipo carretera. Se designaron dos carriles para vehículos viajando en un sentido y dos carriles más para los vehículos viajando en sentido opuesto. La longitud de cada

carril fue fijada a 3 Km con un ancho de 4 m. Cuando un vehículo alcanza el final de un carril es inyectado al inicio de un carril en sentido contrario. La máxima velocidad permitida para un vehículo es de 60 m/s. Aunque la propagación en el espacio libre no corresponde a las características de propagación encontradas en un canal radio para escenarios tipo carretera (Karedal et al., 2011) es importante establecer una referencia del funcionamiento de ambos protocolos cuando no se considera un rango de transmisión dinámico. Por lo tanto, ambos protocolos fueron evaluados considerando tanto el modelo de propagación en el espacio libre como el modelo desarrollado específicamente para VANETs introducido en (Karedal et al., 2011). El patrón de movilidad de cada vehículo fue generado siguiendo el modelo IDM introducido en (M. Treiber et al., 2000). Aún más, como se muestra en (Abdel Hafeez et al., 2011) la aceleración de los vehículos es un parámetro importante que puede afectar la estabilidad de la topología de red. Por lo tanto, los dos protocolos fueron evaluados considerando diferentes valores para la aceleración máxima. Específicamente, estos valores van desde $\alpha = 1.6 \text{ m/s}^2$ hasta $\alpha = 5 \text{ m/s}^2$. Adicionalmente, es importante medir el efecto de la densidad vehicular para evaluar el desempeño del protocolo (Vinayakray-Jani & Sanyal, 2012). Por lo tanto, para la evaluación de ambos protocolos (DDOR y FPBR), se eligieron 4 densidades, λ , distintas, i.e. libre flujo, media, alta y congestionamiento.

Tabla 8. Valores utilizados para los parámetros de la simulación

Parámetro	Valor
Velocidad Máxima	60 m/s
Aceleración Máxima	[1.6–5.0] m/s^2
Densidad Vehicular	[33,66,100,133] v/km
Longitud de la Carretera	3,000 m
Número de Carriles	4
Modelo de movilidad	IDM
Tiempo de simulación	300 s
Tamaño de paquete	2 Kbytes
Frecuencia Base	5.880 GHz
Tasa de datos	6 Mbps
Radio de cobertura	300 mts

Los valores específicos de cada densidad fueron tomados de (Wang et al., 2011), los cuales se muestran en la Tabla 8. Para el transceptor de radio se utiliza el modelo adaptado IEEE 802.11a/p con una tasa de 6 Mbps.

Las métricas de desempeño para cada protocolo fueron obtenidas considerando 4 transmisores. Al inicio de cada corrida de la simulación, cada transmisor tiene un periodo de espera de 5 segundos antes de comenzar cualquier transmisión para permitir el intercambio inicial de PITs. Cuando el periodo de espera termina, cada transmisor elige tanto un tiempo de inicio como un destino aleatorio. Dicho destino puede ser cualquiera de los existentes en el escenario de evaluación, independientemente de su posición o dirección relativa. Una vez que alguno de los 4 vehículos transmisores empieza enviar paquetes, los genera a una tasa de 2 Kbytes por segundo, la cual se mantiene hasta el final de la simulación. Para cada escenario (aceleración-densidad) se realizó un mínimo de 100 simulaciones. Cada simulación tuvo una duración de 300s durante la cual fueron grabadas las métricas. Los valores específicos para cada parámetro de la simulación son presentados en la Tabla 8.

5.4 Análisis de resultados

Dado que en la evaluación de DDOR y FPBR se utilizaron dos diferentes modelos de propagación para el canal radio, las métricas obtenidas para el desempeño de ambos protocolos son presentadas en dos secciones. Los resultados obtenidos considerando el modelo de propagación en el espacio libre son presentados en la subsección 5.4.1. Adicionalmente, la subsección 5.4.2 presenta las métricas obtenidas cuando se considera el modelo de propagación desarrollado ex profeso para escenarios tipo carretera descrito en (Karedal et al., 2011).

5.4.1 Resultados en el espacio libre

Las métricas de enrutamiento obtenidas cuando se incrementa el valor de la aceleración máxima, α , para dos diferentes densidades, λ , son mostradas en las

Figuras 15–17. En la Figura 15(a) se puede observar que la tasa de entrega de paquetes (PDR) es alrededor de 98% para ambos protocolos. Debido a que el radio de transmisión es determinístico cuando se considera una propagación en el espacio libre, para ambos protocolos los paquetes perdidos son producto de colisiones o predicciones erróneas. La Figura 15(a) muestra que ambos tipos de pérdidas de paquetes son manejadas adecuadamente por las estrategias de redundancia implementadas en DDOR y FPBR. Conclusiones similares se pueden obtener observando el número de saltos (NH), el retardo punto a punto (EED) y el retardo promedio por salto mostrados en la Figura 15(b) y Figura 16(a,b) respectivamente. De hecho, puede verse fácilmente en las Figura 15 y Figura 16 que ambos protocolos tienen un buen desempeño considerando las métricas de PDR, NH, EED y retardo por salto.

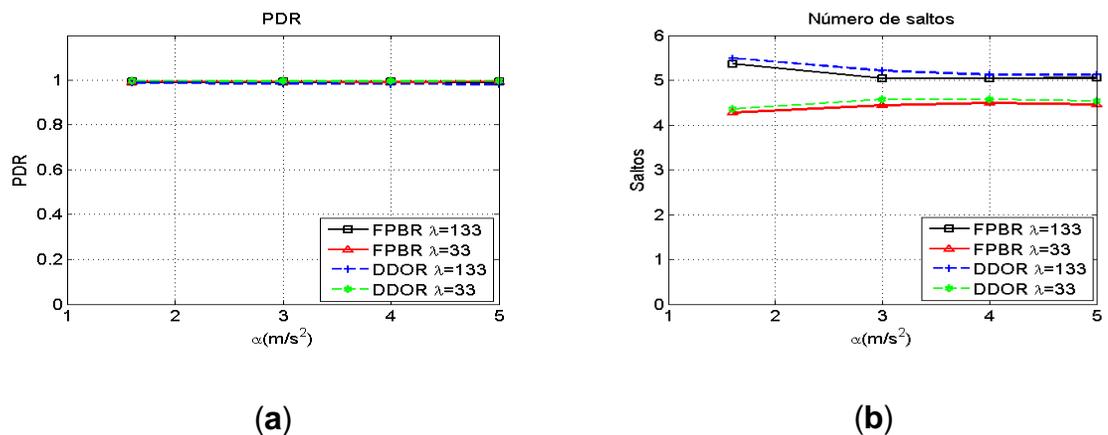


Figura 15. Tasa de entrega de paquetes (PDR) y número de saltos obtenidos cuando se incrementa la aceleración, α . Dos densidades diferentes fueron consideradas para estas graficas: $\lambda = 133$ y $\lambda = 33$. (a) PDR vs. α ; (b) Número de saltos vs. α .

Las métricas de sobrecarga en red y MAC son presentadas en la Figura 17(a,b). De acuerdo con la Figura 17(a), DDOR genera menos paquetes de control que FPBR en la capa de red. Este comportamiento es observado debido a que DDOR implementa su estrategia de redundancia en la capa MAC. Por otro lado, la Figura 17(b) muestra que FPBR obtiene una mejor métrica de sobrecarga en la MAC. Este comportamiento es observado debido a que DDOR utiliza el mecanismo RTS/CTS, por lo tanto, requiere un mínimo de tres paquetes adicionales para la transmisión de un paquete de datos.

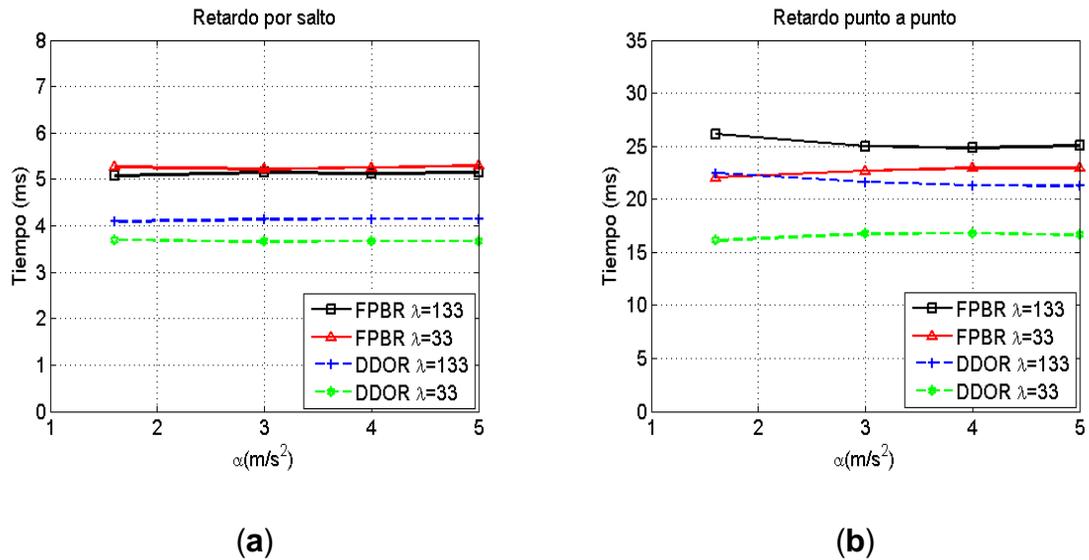


Figura 16. Retardo por salto y retardo punto a punto (EED) obtenidos cuando FPBR y DDOR cuando se incrementa el valor de la máxima aceleración, α . Dos densidades diferentes fueron consideradas para estas gráficas: $\lambda = 133$ y $\lambda = 33$. (a) Retardo por salto vs. α . (b) EED vs. α

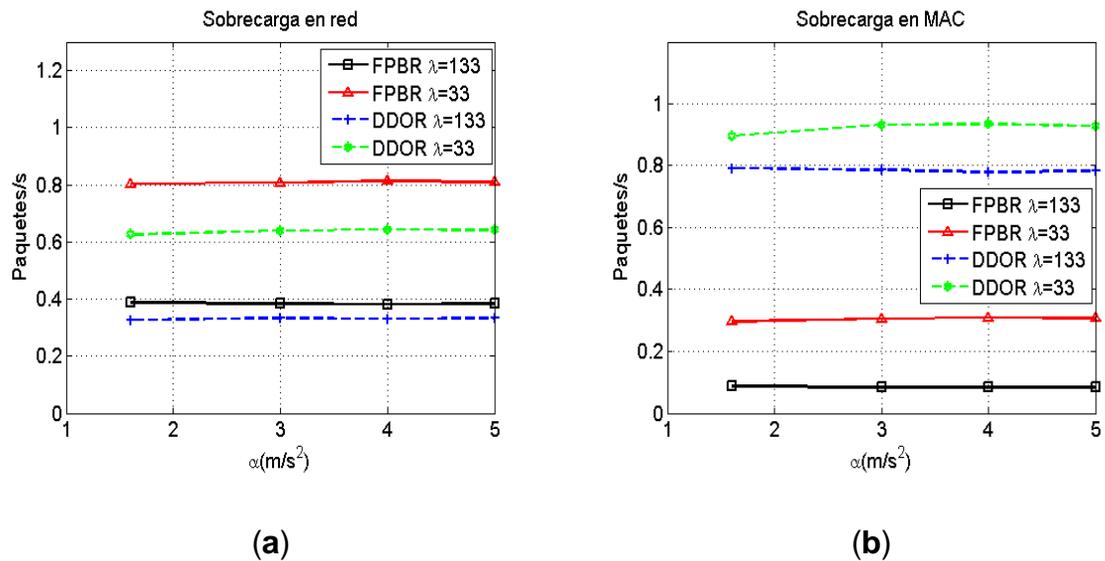
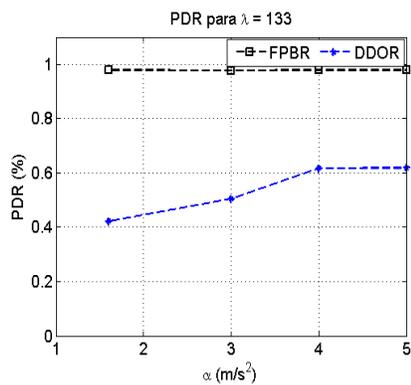


Figura 17. Sobrecarga de red y MAC obtenida para FPBR y DDOR cuando se incrementa el valor máximo de la aceleración, α . Dos densidades diferentes fueron consideradas para estas gráficas: $\lambda = 133$ y $\lambda = 33$. (a) Sobrecarga de red vs. α . (b) Sobrecarga MAC vs. α .

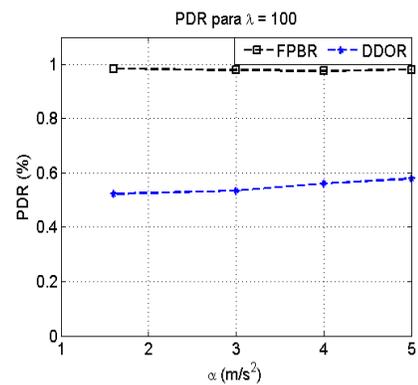
5.4.2 Resultados considerando el modelo de propagación para el canal V2V

En esta subsección se presentan las métricas obtenidas cuando se considera el modelo de propagación desarrollado ex profeso para escenarios tipo carretera

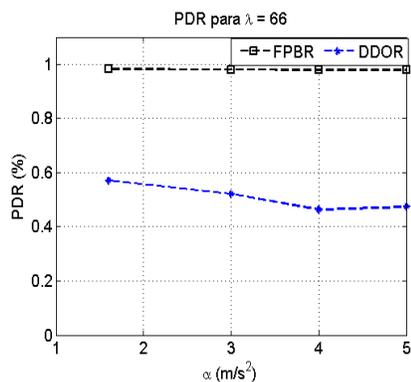
presentado en (Karedal et al., 2011). Se debe recordar que para este canal un paquete transmitido puede no alcanzar la frontera del radio de cobertura nominal debido a las pérdidas por propagación y al desvanecimiento lento (ver Sección 2.3.1.1). Así, para este tipo de canal un paquete puede no llegar a su destino debido a una colisión, a una mala predicción del AP o a las condiciones adversas del canal.



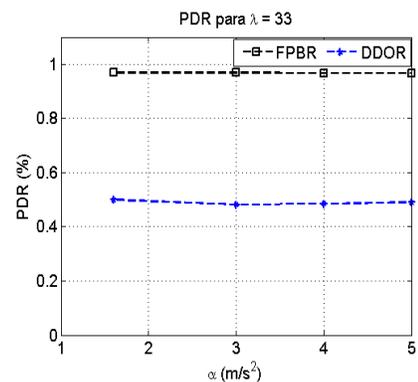
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 18 Tasa de entrega de paquetes obtenida con FPBR y DDOR cuando se incrementa el valor de la máxima aceleración, α . Cuatro densidades de vehículos diferentes, λ , fueron consideradas para estas gráficas. Cada gráfico muestra el número de saltos promedio vs. α para: (a) $\lambda = 133$; (b) $\lambda = 100$; (c) $\lambda = 66$ y (d) $\lambda = 33$.

La Figura 18 presenta el PDR obtenido con FPBR y DDOR cuando se incrementa el valor de la aceleración máxima, α . Cuatro densidades de vehículos diferentes, λ ,

fueron consideradas para esta Figura. En la Figura 18 se puede observar que DDOR obtiene una PDR mucho menor que cuando se considera la propagación en el espacio libre. En contraste, la PDR obtenida por FPBR muestra un desempeño similar al observado en la Figura 15(a). La caída en el desempeño de DDOR es debido a que cuando selecciona el siguiente salto, subestima los efectos del canal radio V2V. Como es explicado en la Sección 3, FPBR considera las restricciones específicas impuestas por el canal V2V en escenarios tipo carretera cuando selecciona el siguiente salto a través del mecanismo MFWAR. Así, cuando se considera el canal radio para V2V, el desempeño de FPBR no muestra una baja en su desempeño muy significativa comparado con el que se obtiene cuando se considera una propagación en el espacio libre. Adicionalmente, note que la PDR obtenida por FPBR no se afecta de manera significativa por la variación de la aceleración. Esto significa que el mecanismo de respaldo implementado en FPBR es capaz de manejar tanto las colisiones como las predicciones erróneas hechas por el mecanismo de descubrimiento.

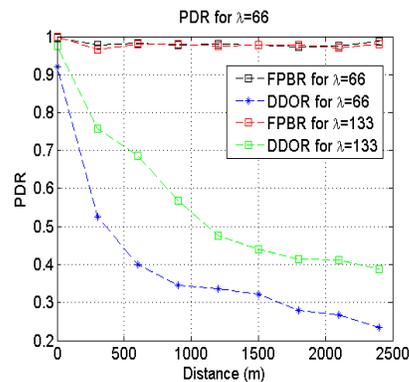
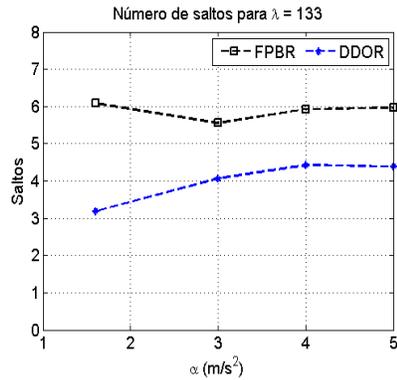


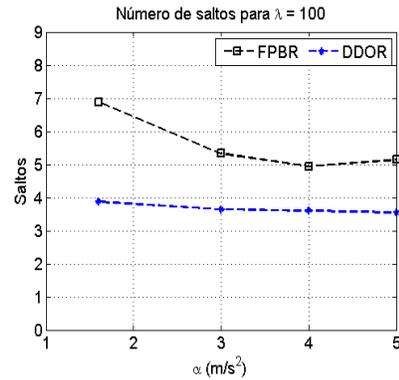
Figura 19. Tasa de entrega de paquetes (PDR) obtenida para FPBR and DDOR cuando se incrementa la distancia fuente-destino. El valor de la aceleración máxima es fijado a $\alpha = 4$. Dos densidades de vehículos diferentes, $\lambda = 66$ and $\lambda = 133$, fueron consideradas para esta Figura

La Figura 19 muestra la PDR obtenida por FPBR y DDOR cuando se incrementa la distancia fuente-destino. La gráfica en la Figura 19 fue obtenida fijando los parámetros $\alpha = 4$ con $\lambda = 66$ y $\lambda = 133$. En la Figura 19, se puede observar como la PDR obtenida por DDOR exhibe un comportamiento decreciente conforme se

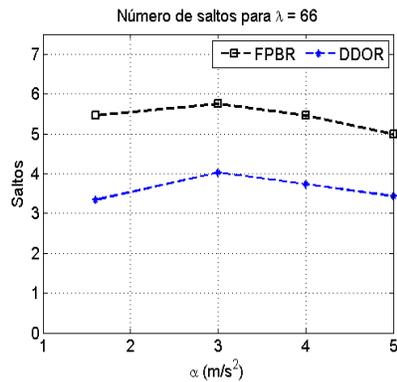
incrementa la distancia entre la fuente y el destino. Esto, es debido a las selecciones del siguiente salto erróneas hechas por DDOR. En contraste, FPBR provee una PDR significativamente más alta comparada con DDOR.



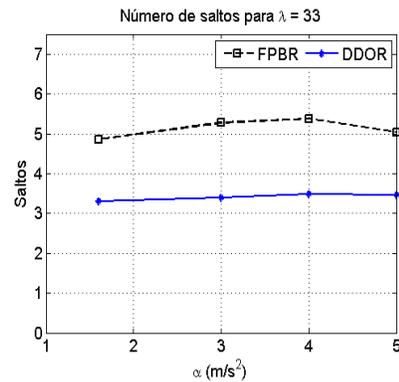
(a)



(b)



(c)

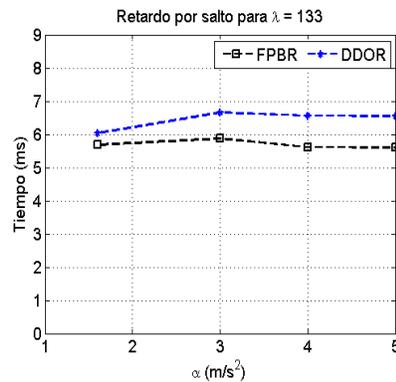


(d)

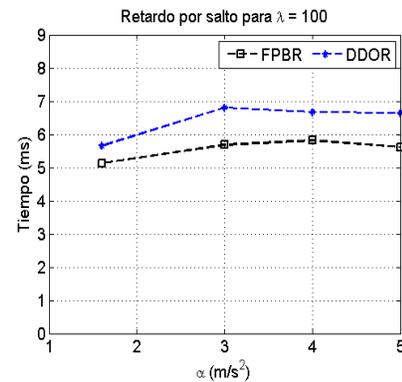
Figura 20. Número de saltos promedio obtenidos con FPBR y DDOR cuando se incrementa el valor de la máxima aceleración, α . Cuatro densidades de vehículos diferentes, λ , fueron consideradas para estas gráficas. Cada gráfico muestra el número de saltos promedio vs. α para: (a) $\lambda = 133$; (b) $\lambda = 100$; (c) $\lambda = 66$ y (d) $\lambda = 33$.

La Figura 20 ilustra los efectos en el número de saltos por paquetes promedio de incrementar el valor de la aceleración máxima, α , para las diferentes densidades de vehículos, λ . Se puede observar en esta Figura 20 que DDOR realiza menos saltos para entregar un paquete. Aunque al principio esto puede parecer una ventaja, la razón para que DDOR obtenga un menor número de saltos es el

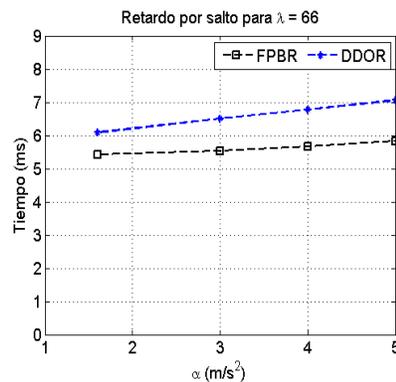
incremento en las pérdidas de paquetes conforme se aumenta la distancia fuente-destino (ver Figura 19). Por otro lado, el número de saltos de FPBR es mayor debido a que éste es capaz de entregar paquetes que viajan distancias fuente-destino más grandes.



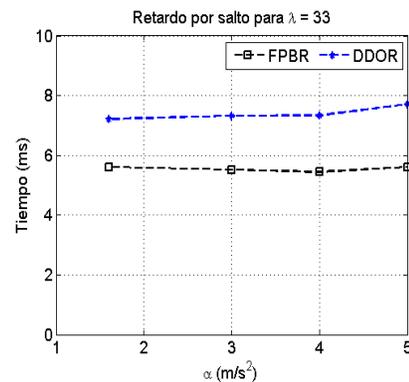
(a)



(b)



(c)

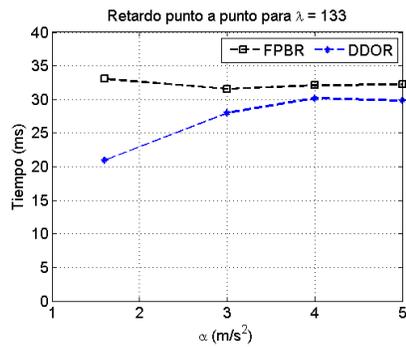


(d)

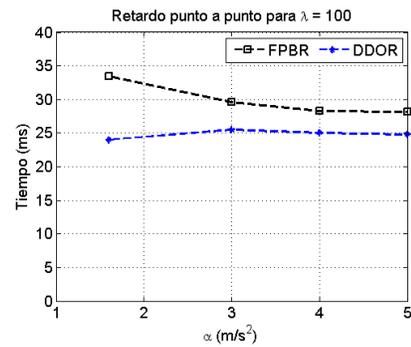
Figura 21. Retardo por salto promedio obtenidos con FPBR y DDOR cuando se incrementa el valor de la máxima aceleración, α . Cuatro densidades de vehículos diferentes, λ , fueron consideradas para estas gráficas. Cada gráfico muestra el número de saltos promedio vs. α para: (a) $\lambda = 133$; (b) $\lambda = 100$; (c) $\lambda = 66$ y (d) $\lambda = 33$

La Figura 21 muestra los efectos en la métrica del retardo por salto promedio de incrementar el valor de la aceleración máxima, α , para diferentes densidades de vehículo, λ . En la Figura 21 se puede observar que FPBR logra un retardo por salto menor que DDOR. Esto significa que el mecanismo de selección de siguiente salto

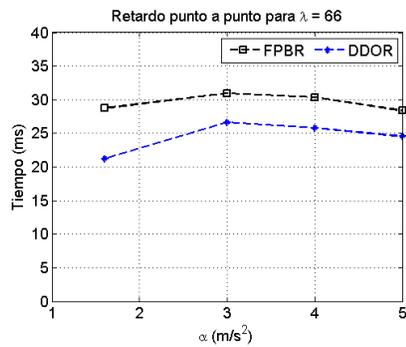
de FPBR hace menos selecciones erróneas que el mecanismo de DDOR. Aún más, como se mencionó previamente el mecanismo RTS/CTS necesita al menos 3 paquetes mientras que la estrategia de redundancia de FPBR implementa un mecanismo de acuse de recibo implícito. Por lo tanto, cuando se hace una selección errónea, DDOR genera una contención en el acceso al medio más alta que la generada por FPBR.



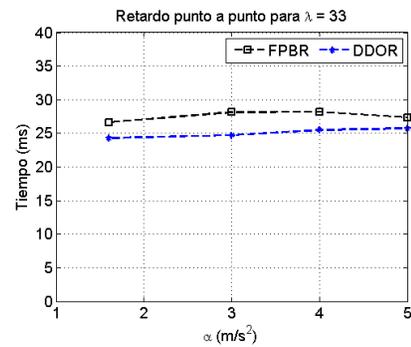
(a)



(b)



(c)

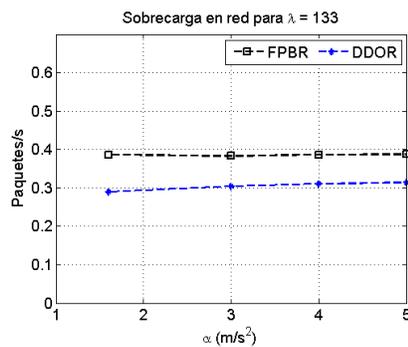


(d)

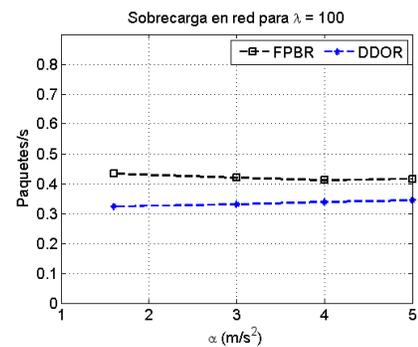
Figura 22. Retardo punto a punto promedio (EED) obtenido con FPBR y DDOR cuando se incrementa el valor de la máxima aceleración, α . Cuatro densidades de vehículos diferentes, λ , fueron consideradas para estas gráficas. Cada gráfico muestra el número de saltos promedio vs. α para: (a) $\lambda = 133$; (b) $\lambda = 100$; (c) $\lambda = 66$ y (d) $\lambda = 33$

La Figura 22 ilustra el comportamiento de la métrica EED cuando se incrementa la aceleración, α , para cuatro diferentes densidades de vehículos, λ . Se puede observar en la Figura 22 que cuando se incrementa α DDOR incrementa el EED

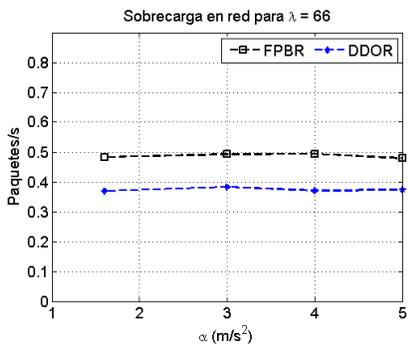
para $\lambda = 133$ and $\lambda = 100$ (i.e., densidades media y de congestión). En contraste, cuando se utiliza FPBR los cambios en el valor de la aceleración máxima no derivan a un incremento en el EED para estas densidades vehiculares. El protocolo muestra este comportamiento debido a su algoritmo de selección de siguiente salto descrito en la Sección 4.1. Así, se puede inferir que utilizar los factores dinámicos β_a , β_c y β_s disminuye la probabilidad de hacer una selección errónea. Note que para la densidad de libre flujo, $\lambda = 33$, el cambio en la aceleración, α , parece no tener un impacto significativo en la métrica EED. Este comportamiento es observado debido a que el AP de ambos protocolos en esta densidad es más preciso.



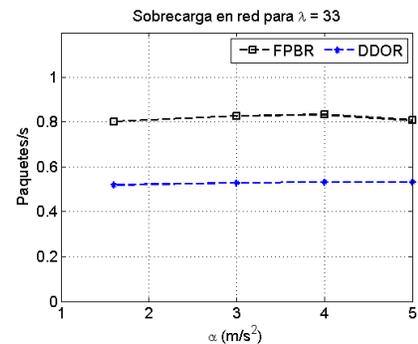
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 23. Sobrecarga de red normalizada obtenida con FPBR y DDOR cuando se incrementa el valor de la máxima aceleración, α . Cuatro densidades de vehículos diferentes, λ , fueron consideradas para estas gráficas. Cada gráfico muestra el número de saltos promedio vs. α para: (a) $\lambda = 133$; (b) $\lambda = 100$; (c) $\lambda = 66$ y (d) $\lambda = 33$.

La Figura 23 muestra los efectos en la métrica de la sobrecarga en red de incrementar el valor de la aceleración máxima, α , para diferentes densidades vehiculares, λ . Como se mencionó previamente, DDOR implementa el mecanismo RTS/CTS en la capa MAC. Así, la sobrecarga introducida por DDOR en la capa de red consiste principalmente en los PITs enviados. Consecuentemente, la sobrecarga en red de DDOR es menor que la introducida por FPBR (ver Figura 23). Note que para, $\lambda = 33$, ambos protocolos muestra una sobrecarga de red mayor (ver Figura 23(d)). Esto es causado por el mecanismo adaptativo de PITs implementado en ambos protocolos.

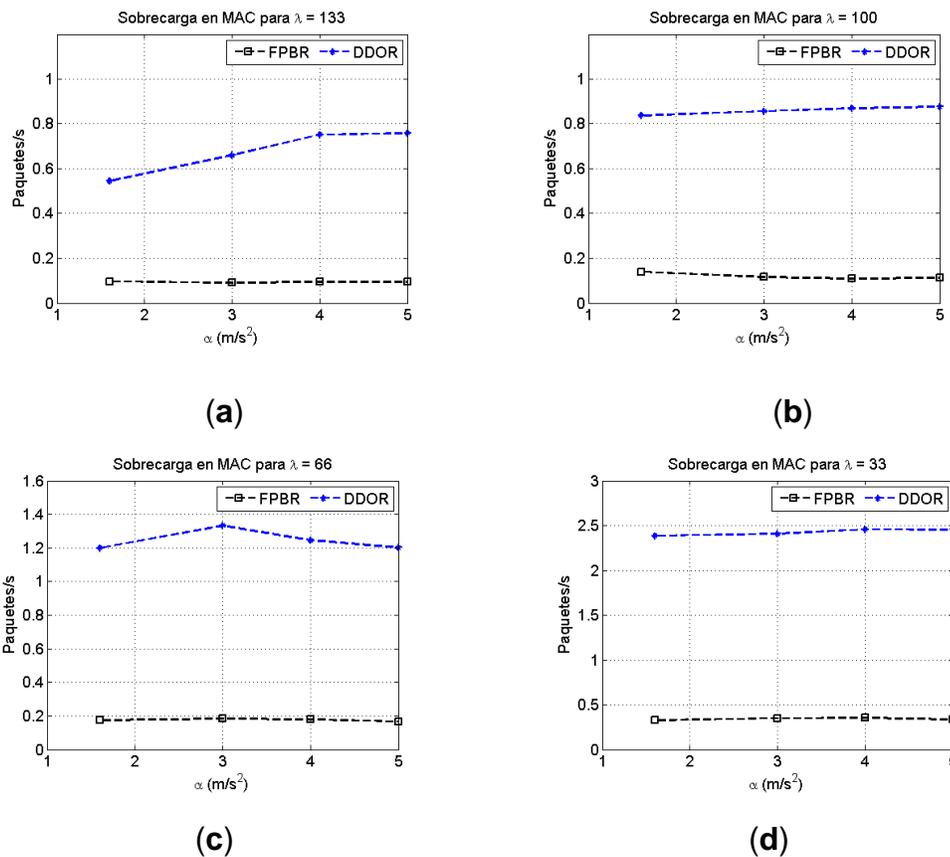


Figura 24. Sobrecarga en MAC normalizada obtenida con FPBR y DDOR cuando se incrementa el valor de la máxima aceleración, α . Cuatro densidades de vehículos diferentes, λ , fueron consideradas para estas gráficas. Cada gráfico muestra el número de saltos promedio vs. α para: (a) $\lambda = 133$; (b) $\lambda = 100$; (c) $\lambda = 66$ y (d) $\lambda = 33$.

Finalmente, la Figura 24 muestra la sobrecarga en la capa MAC obtenida cuando se incrementa el valor de la máxima aceleración, α , para diferentes densidades vehiculares, λ . Como se mencionó en la Sección 4.6.1, el mecanismo de RTS/CTS utilizado en DDOR necesita un mínimo de tres paquetes adicionales para transmitir un solo paquete de datos. Consecuentemente, este mecanismo incrementa la sobrecarga introducida en la capa MAC. En contraste, FPBR introduce una sobrecarga menor, esto es debido a que FPBR implementa un mecanismo de acuse de recibo implícito en su estrategia de redundancia, como se explica en la Sección 4.3.2.1. Adicionalmente, FPBR suprime el mecanismo RTS/CTS para la transmisión de paquetes de datos. Así, FPBR mitiga los efectos de las selecciones erróneas con menos paquetes que los requeridos por DDOR.

5.5 Resumen

En este capítulo se introdujo un nuevo protocolo de enrutamiento para VANETs llamado FPBR. El diseño de FPBR fue enfocado a VANETs desplegadas en escenarios tipo carretera. De esta manera, el desempeño de FPBR fue comparado con el desempeño mostrado por el protocolo DDOR, el cual es uno de los pocos protocolos desarrollados explícitamente para comunicaciones V2V en escenarios tipo carretera. Cuando se evaluó el desempeño de estos protocolos en condiciones de propagación en el espacio libre, FPBR obtuvo métricas de desempeño similares a las obtenidas por DDOR. Sin embargo, cuando se consideraron las condiciones de propagación V2V presentes en escenarios tipo carretera, las métricas de desempeño obtenidas para ambos protocolos muestran que FPBR supera a DDOR. La razón de esto es que FPBR incluye varios mecanismos que ayudan a manejar las pérdidas de paquetes causadas por las condiciones impuestas por el canal radio en escenarios vehiculares tipo carretera. Particularmente, se muestra que tanto el algoritmo de selección del siguiente salto de FPBR como el mecanismo de acuse de recibo implícito son parte vital cuando se considera el modelo de propagación desarrollado para VANETs desplegadas

en carreteras. Esto debido a que tales mecanismos permiten una selección conveniente tanto del primer salto como de los nodos de respaldo. Consecuentemente, estos mecanismos permiten a FPBR obtener una alta tasa de entrega de paquetes. Aún más, los resultados de simulación muestran que ni la estrategia de redundancia ni el servicio de descubrimiento de FPBR agregan una sobrecarga significativa, aun a pesar de que el servicio de descubrimiento está basado en la transmisión de paquetes *broadcast*. De esta manera, con los resultados presentados en la sección anterior, se puede establecer que con el propósito de mejorar el desempeño de los protocolos de enrutamiento enfocados a escenarios tipo carretera, las restricciones impuestas por el canal radio en este tipo de escenarios deben ser consideradas en el diseño de la estrategia de enrutamiento. Por esta razón, FPBR es un protocolo adecuado para VANETs desplegadas en escenarios tipo carretera, ya que ofrece diversas ventajas comparado con los protocolos tradicionales (e.g. AODV y GPSR-L) y además supera el desempeño del protocolo líder para este tipo de escenarios, i.e. DDOR.

Capítulo 6

Diseño y evaluación de un algoritmo de enrutamiento *broadcast* para VANETs enfocado a escenarios tipo carretera.

El diseño de un protocolo de disseminación de datos se centra en atender el compromiso entre robustez y sobrecarga a través de la técnica de supresión de *broadcast* (TSB) (Amoroso et al., 2011; Liu & Chigan, 2012; Schwartz et al., 2011; O. Tonguz et al., 2010). Es decir, utilizar la menor cantidad de paquetes de difusión (“*broadcast*”) redundantes para lograr que el mensaje sea entregado, en el menor tiempo posible, a todos los vehículos dentro de la zona de relevancia. De acuerdo a (Wu et al., 2012), los protocolos de disseminación orientados al receptor son los más aptos para manejar el compromiso entre robustez y sobrecarga. Esto debido a que cada nodo cuenta con, por lo menos, información de los nodos que integran su vecindario a un salto para seleccionar el conjunto de vehículos retransmisores (e.g. ubicación, dirección de movimiento, etcétera). Esta información, es adquirida a través de un mecanismo que permite el intercambio periódico de paquetes de información topológica (PITs) entre los nodos. Por lo tanto, un protocolo de disseminación asistido consta de dos módulos básicos: el mecanismo de intercambio de PITs y la TSB. En este trabajo, presentamos una propuesta llamada Algoritmo de Disseminación *broadcast* por Máximo avance, con un mecanismo de intercambio de PITs adaptativo DBMA-PA. Adicionalmente, se agrega un mecanismo de acuse de recibo implícito para retransmitir el mensaje en caso de que el mensaje original no haya llegado al siguiente salto. En este capítulo se presenta el diseño y evaluación de la TSB como el mecanismo adaptativo de intercambio de PITs que conforman el protocolo DBMA-PA.

6.1 Mecanismo de intercambio de PITs

En los algoritmos de disseminación asistidos el conjunto de nodos retransmisores es elegido tomando como base la información adquirida a través del mecanismo de intercambio de PITs. Así, el objetivo principal de los PITs es reflejar con la mayor precisión posible la topología del vecindario para que el protocolo pueda tomar una mejor decisión (por ejemplo, elegir un nodo o conjunto de nodos que permita un mayor avance con el menor número de retransmisiones redundantes). De esto se puede inferir fácilmente que un factor importante en la precisión de la información es la frecuencia de intercambio de PITs. Es decir, a mayor frecuencia de PITs mayor precisión en la información. Sin embargo, en una red IEEE 802.11 una mayor frecuencia de emisión de PITs aumenta la contención por el acceso al medio. Lo anterior puede ocasionar una mayor pérdida de paquetes, y por lo tanto, un mayor retardo. Esto hace evidente que adicional al compromiso entre robustez y sobrecarga en la TSB, los protocolos de disseminación asistidos deben considerar el compromiso entre precisión y sobrecarga presente en el mecanismo de intercambio de PITs. Sin embargo, la mayoría de los protocolos encontrados en la literatura consideran una frecuencia fija de envío de PITs.

La topología de red depende de las características del movimiento del grupo de vehículos que la conforman. Esto implica que en un escenario muy dinámico, el vecindario de un vehículo puede cambiar fácilmente. Así, sería necesaria una frecuencia de intercambio de PITs más alta para seguir con mayor facilidad estos cambios. Por otro lado, en un escenario donde un grupo de vehículos permanece unido periodos más largos, el intercambio de PITs puede llevarse a cabo con menor frecuencia. Por lo tanto, se puede inferir que es importante observar los parámetros que están involucrados en la estabilidad de un grupo de vehículos para poder determinar la frecuencia adecuada de envío PITs.

De acuerdo con la recopilación hecha en (Harri et al., 2009), existen dos conjuntos de características principales que determinan el movimiento de un grupo de

vehículos, las macroscópicas y las microscópicas. El grupo de características microscópicas define con detalle las propiedades de movimiento de cada vehículo en lo individual, e.g. velocidad, aceleración, cambio de carril, frenar, etcétera. Por otro lado, las características macroscópicas definen el movimiento de un grupo de vehículos. Por ejemplo, densidad de tráfico, velocidad promedio, etcétera. Entonces, las características microscópicas caracterizan el tiempo de duración de cada uno de los enlaces existentes entre un nodo en particular y sus vecinos. Mientras que las características macroscópicas caracterizan el movimiento del vecindario como grupo. Por esto, las características macroscópicas pueden tener mayor relevancia cuando se determina la frecuencia de intercambio de PITs. Por lo tanto, este trabajo se enfoca en las características macroscópicas para el diseño del mecanismo adaptativo de dicha frecuencia.

Las características macroscópicas pueden ser obtenidas a través del intercambio de los PITs. Por ejemplo, de acuerdo a los trabajos hechos por (Bai, Sadagopan, & Helmy, 2003) y (Martin Treiber et al., 2000), la velocidad de un automóvil está relacionada íntimamente con el comportamiento del vehículo que circula frente a él (vehículo frontal). Específicamente, la velocidad de un automóvil depende de la velocidad del vehículo frontal y de la distancia que existe entre el propio automóvil y el vehículo frontal. De esta manera, la velocidad del vehículo frontal depende a su vez del vehículo delante de él. Por lo tanto, el comportamiento de la velocidad del grupo puede ser estimado a través de las velocidades individuales y la inter-distancia vehicular. Ambos parámetros pueden ser fácilmente obtenidos a través de los PITs.

6.1.1 Antecedentes

En diversos trabajos de investigación se muestra el interés existente en abordar el compromiso entre precisión y sobrecarga en el mecanismo de intercambio de PITs a través de ajustar dinámicamente la frecuencia de emisión de estos paquetes. Por ejemplo, en (Naumov & Gross, 2007) los autores utilizan el número

de vecinos que tiene cada vehículo que ha registrado para determinar la frecuencia de emisión de PITs. La idea principal de este mecanismo reside en que a menor número de vecinos la precisión requerida en la información es mayor. Sin embargo, en (Naumov & Gross, 2007) no se considera un escenario multi-carril. El problema con esto es que la mayor parte de los vecinos pueden estar en el carril de alta velocidad o incluso en uno en sentido contrario, por lo que pueden salir rápidamente de su radio de cobertura y por lo tanto, la frecuencia elegida puede ser incorrecta. En (Ghafoor et al., 2011) se propone un mecanismo adaptativo llamado ABR. Éste mecanismo también está basado en el número de vecinos que cada vehículo registra. Aunque en ABR si se considera el número de vehículos que circulan en dirección contraria para determinar la frecuencia con que se emiten los PITs. Aun puede existir menor precisión a la deseada pues en el diseño de ABR no se considera que los vecinos pueden estar en otro carril. Adicionalmente, tanto en (Ghafoor et al., 2011; Naumov & Gross, 2007) solo se tiene una medida de la cantidad de vecinos registrados, pero no de la distribución espacial de estos, es decir, no se conoce la densidad de vehículos. Esto puede ocasionar que la frecuencia determinada no produzca la precisión necesaria. En (Sahu et al., 2010), los autores proponen un mecanismo de PITs adaptativo basado en la velocidad de cada vehículo. Este mecanismo puede tener problemas en adaptarse a escenarios donde son permitidas altas velocidades, por ejemplo, carreteras donde una gran cantidad de vehículos pueden mantener una alta velocidad durante largos periodos. En este tipo de escenarios, el mecanismo genera una sobrecarga mayor a la necesaria debido a que la mayoría de los vehículos mantienen una frecuencia de envío de PITs alta. En (Schmidt, Leinmuller, Schoch, Kargl, & Schafer, 2010) los autores hacen un estudio cualitativo de las estrategias adaptativas basadas en velocidad. En este trabajo, concluyen que considerar solo la velocidad del propio vehículo para determinar la frecuencia de emisión de PITs puede ocasionar mayor sobrecarga. Por lo tanto, es necesario considerar otros criterios adicionales a la velocidad. Adicionalmente, estas propuestas no fueron diseñadas con un algoritmo de diseminación *broadcast*

multi-salto en mente. Por esta razón, no se toman en cuenta factores importantes para que los mecanismos adaptativos puedan ser implementadas como fuente de información por la TSB para elegir el conjunto de retransmisores.

De la discusión anterior, podemos determinar que una de las características más importantes al determinar la frecuencia con que se emiten los PITs es la velocidad de los vehículos. A menor velocidad, se puede inferir que la densidad de los vehículos es mayor (Kerner, 2004; Wang et al., 2011), por lo tanto el grupo de vehículos puede permanecer unido por más tiempo. Sin embargo, en escenarios tipo carretera podría ser posible que los vehículos viajen a una alta velocidad y además se mantengan unidos durante un tiempo considerable. En este caso, no se requiere una frecuencia de envío alta, pues a pesar de la velocidad, el grupo de vehículos se mantiene estable. Por lo tanto, para determinar una frecuencia más adecuada, es necesario considerar también la densidad de tráfico. Es importante mencionar que considerar solamente la densidad para determinar la frecuencia de envío de PITs puede ocasionar un problema similar al que se presenta que cuando solo se considera la velocidad. Es decir, en una densidad baja que se desplaza lento puede haber un mayor número de PITs que el requerido. Por lo tanto, el mecanismo adaptativo para el envío de PITs introducido en este trabajo considera ambas características, densidad y velocidad, a través de los factores γ y δ que se describen a detalle en las subsecciones 6.1.2 y 6.1.3 respectivamente.

6.1.2 Factor de velocidad (γ)

De acuerdo a (Kerner, 2004; Wang et al., 2011), a mayor velocidad se puede inferir menor densidad de tráfico, por lo tanto, se requiere un mayor número de PITs. Sin embargo, si se considera solo la velocidad propia puede existir la problemática mencionada en la subsección anterior (6.1.1), i.e. emitir un mayor número de PITs al requerido en grupos de vehículos que viajan grandes distancias juntos. Para mitigar esta problemática, se considera la velocidad promedio del grupo en la siguiente expresión:

$$\gamma_i = \frac{|v_i - v_\mu|}{v_{max}} \quad (6)$$

Donde: v_i es la velocidad del móvil i ; v_μ es la velocidad promedio de los vecinos del vehículo i y v_{max} es la velocidad máxima permitida.

El objetivo del parámetro γ es ponderar la diferencia entre la velocidad de un vehículo y el grupo en el que viaja. De la ecuación (6) podemos observar que si ambas velocidades son iguales entonces el parámetro γ también lo es. Por lo tanto la frecuencia requerida es menor. Por otro lado, si la diferencia entre ambas es muy grande, γ tiende a 1. Por lo tanto, se asigna una frecuencia de PITs mayor, debido a que probablemente el vehículo i se alejara pronto de su grupo.

6.1.3 Factor de densidad (δ)

Un factor importante para la eficiencia de las redes IEEE 802.11 es la cantidad de nodos que intentan acceder al medio de manera concurrente. Adicionalmente, a mayor densidad de vehículos se puede inferir que la topología de red es más estable. Por lo tanto, es importante incluir la densidad al determinar la frecuencia con que se emiten los PITs. Aunque existen algunas propuestas donde se considera el número de vecinos en el diseño del mecanismo adaptativo (Ghafoor et al., 2011; Naumov & Gross, 2007), en éstas no se considera la distribución espacial de los vecinos. Esto es importante debido a que en un grupo de vehículos esparcidos, la topología puede cambiar con mayor facilidad. En el factor δ se considera esta característica calculando la distancia promedio del vehículo i hacia cada uno de sus vecinos con la siguiente expresión:

$$\delta_i = \frac{1}{N_v} \sum_{j=1}^{N_v} \frac{d(x_i, x_j)}{R_\beta} \quad (7)$$

Donde: N_v es el número de vecinos del nodo i ; $d(x_i, x_j)$ es la distancia entre el nodo i y el vecino j ; R_β es el radio de cobertura acotado por los factores $\beta_a, \beta_c, \beta_s$ (ver Sección 6.3). Dado que el factor δ puede verse afectado por valores mucho más grandes que el conjunto de los otros, el factor es ponderado a través de la desviación estándar como se muestra a continuación:

$$\delta_{i_\sigma} = \sqrt{\left(\frac{1}{N_v} \left(\sum_{j=1}^{N_v} (d(x_i, x_j) - \delta_i)^2 \right) \right)} \quad (8)$$

$$\delta_p = \frac{\delta_i}{\delta_{i_\sigma} + 1} \quad (9)$$

Donde: N_v es el número de vecinos del nodo i ; $d(x_i, x_j)$ es la distancia entre el nodo i y el vecino j ; δ_i es la inter-distancia promedio; δ_{i_σ} es la desviación estándar de la inter-distancia y δ_p es la inter-distancia promedio ponderada.

Como se puede observar de la Ecuación (7), un valor 0 de δ_i significa que la inter-distancia entre los vehículos del vecindario de i es muy pequeña. Mientras que un valor de 1, significa que el vehículo i está en el centro y sus vecinos muy cercanos al borde de su radio de cobertura. Por lo tanto, un valor cercano a 0 se traduce en una menor frecuencia de emisión de PITs. Adicionalmente, δ_i está ponderado por la desviación estándar a través de la Ecuación (9). El propósito de esta ponderación es mitigar el efecto de valores que puedan estar muy alejados del promedio.

Como se mencionó, para determinar la frecuencia con que cada vehículo emite sus PITs, en el presente trabajo se consideraron los factores γ y δ descritos en la sección 6.1.2 y 6.1.3 respectivamente. La combinación de estos factores para calcular la frecuencia de envío de PITs no es trivial, pues la ponderación adecuada de cada factor es muy importante para la efectividad del protocolo. La combinación de ambos se explica a continuación. Cuando un vehículo recibe el PIT de un vecino, recalcula los factores δ y γ de acuerdo a las ecuaciones (6) y (9) para que estén disponibles al momento de determinar el tiempo de espera para enviar su siguiente PIT. Una vez que el PIT ha sido enviado, se inicia el proceso de calcular un nuevo tiempo de espera, τ , a través del FIS diseñado para combinar los factores de velocidad y densidad. Este proceso consta de 4 pasos que se describen a continuación:

1. Fusificación: Determinar el grado de pertenencia de las variables de entrada, δ y γ , a los conjuntos difusos a través de las membresías (ver Figura 26 y Figura 27) y las variables lingüísticas definidas.
2. Mapear los valores difusos obtenidos $\hat{\delta}$ y $\hat{\gamma}$ al conjunto de reglas si/entonces definidas (ver Tabla 9).
3. Combinar el resultado de cada regla para obtener el valor de salida difuso $\hat{\tau}$.
4. Desfusificar el valor de $\hat{\tau}$ a través de un método apropiado para obtener el temporizador τ . Específicamente, en el FIS diseñado para este trabajo se empleó el método del centroide.

Después τ segundos, se emite un nuevo PIT y se repite el proceso para determinar un nuevo tiempo de espera τ desde el paso 1. Este proceso es llevado a cabo con los nuevos valores de δ y γ . En las siguientes subsecciones se detallan cada uno de los pasos del FIS aquí descritos.

6.2.1 Fusificación

Una membresía es una función que mapea valores numéricos a valores difusos a través de determinar su grado de pertenencia a las distintas variables lingüísticas definidas. Este proceso es conocido como fusificación. En este trabajo, se definió una membresía para cada uno de los factores que se consideraron. Aunque existen diferentes tipos de formas geométricas para conformar las membresías, en este trabajo se eligieron las membresías triangulares debido a la facilidad con que se pueden modelar y por lo tanto tienen mayor eficiencia computacional. De hecho, debido a esto, las membresías triangulares son ampliamente usadas como en (Ghafoor et al., 2011; Wu et al., 2012).

La membresía del factor de velocidad γ está definida en la Figura 26. Esta, puede tomar los valores {igual, similar, diferente}. Es importante mencionar que los valores de esta y las demás membresías fueron determinados a través de una heurística apoyada en los resultados observados como en (Ghafoor et al., 2011; Wu et al., 2012).

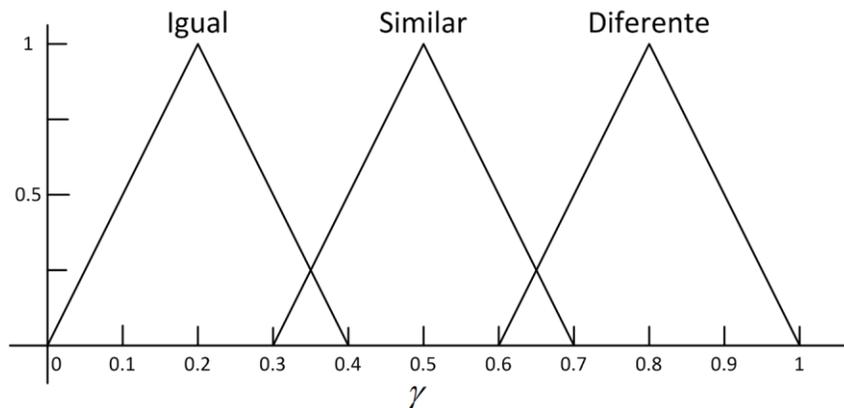


Figura 26 Membresías para el factor de velocidad γ

De manera similar, la membresía para el factor de densidad δ esta definida en la Figura 27. Esta membresía puede tomar los valores de {muy baja, baja, media, alta}.

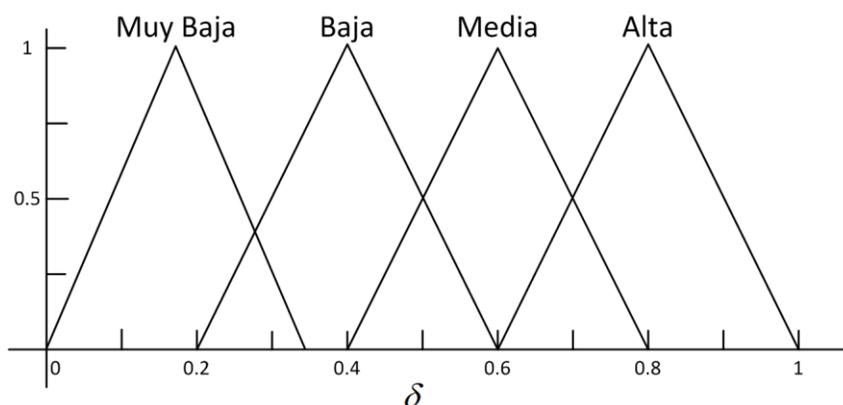


Figura 27 Membresías para el factor de densidad δ

6.2.2 Base de reglas lógicas

Una vez que se han mapeado los valores numéricos a las variables lingüísticas, se utilizan las reglas si/entonces. Cada regla considera los valores lingüísticos obtenidos de los factores δ y γ para establecer un valor de la membresía de frecuencia.

Tabla 9. Base de reglas para el Sistema de inferencia propuesta

	Velocidad	Densidad	Frecuencia
Regla 1	Igual	Muy Baja	Alta
Regla 2	Igual	Baja	Media
Regla 3	Igual	Media	Media
Regla 4	Igual	Alta	Baja
Regla 5	Similar	Muy Baja	Alta
Regla 6	Similar	Baja	Media
Regla 7	Similar	Media	Media
Regla 8	Similar	Alta	Baja
Regla 9	Diferente	Muy Baja	Muy Alta
Regla 10	Diferente	Baja	Alta
Regla 11	Diferente	Media	Media
Regla 12	Diferente	Alta	Baja

Por ejemplo, si la velocidad de un vehículo es *diferente* a la de su grupo y la densidad es *baja* entonces hay mayor probabilidad de que el grupo se disgregue rápidamente, por lo que se debería elegir una frecuencia de PITs *alta*. A los

valores de la condicionante (e.g. diferente, baja) se les llama antecedentes y al resultado de la regla, consecuencia. Las reglas derivadas de las combinaciones anteriores son mostradas en la Tabla 9.

Como se mencionó anteriormente, un valor numérico no necesariamente pertenece a un solo conjunto difuso, es decir una velocidad de 40 km/h puede tener un grado de pertenencia de 0.5 al conjunto baja y con 0.5 al conjunto media. Por lo tanto, más de una regla puede aplicar de manera concurrente. Así, se debe implementar un método para combinar los resultados de las reglas que apliquen. En este trabajo, utilizamos el método Min-Max. En este método, se asigna el mínimo valor de los antecedentes como el valor de la consecuencia. Adicionalmente, en caso de que exista más de un valor para una consecuencia, se elige el máximo. Aunque existen diferentes métodos para la combinación de las reglas, sin pérdida de generalidad se decidió utilizar el de min-max debido a que presenta baja complejidad computacional en su operación. Adicionalmente, este método es uno de los más utilizados en la literatura revisada (Milanés, Pérez, Godoy, & Onieva, 2012; Wu et al., 2012; Zhang, Lu, & Zhang, 2004).

6.2.3 Desfusificación

Finalmente, una vez obtenido los valores difusos para el conjunto de reglas, se debe emplear un método para desfusificar estos valores. En este trabajo, se emplea el método del centro de gravedad (COG) por ser uno de los más populares y eficientes (Wu et al., 2012; Yamakawa, 2011). Este método consiste en calcular el centro de gravedad del área formada por las consecuencias (resultado de las reglas si/entonces) a través de la Ecuación (10):

$$COG = \frac{\int \mu(x)x dx}{\int \mu(x) dx} \quad (10)$$

El resultado obtenido de la Ecuación (10) es finalmente el valor de τ buscado. Después de calcular este valor, el nodo esperará τ segundos para calcular un nuevo valor del temporizador τ a través del FIS.

6.3 Técnica de supresión de *broadcast* (TSB)

La TSB es una de las partes fundamentales del algoritmo de disseminación. Como se mencionó previamente, es importante considerar las restricciones impuestas por el escenario al diseñar un algoritmo de enrutamiento. Por lo tanto, además de las condiciones de movilidad del escenario (velocidad máxima, carriles, etc.) considerar los efectos del canal sobre la propagación de la señal es de suma importancia, tanto en el diseño como en la evaluación de los algoritmos de disseminación. Desde el punto de vista de la capa física, la propagación de un mensaje *unicast* en una red 802.11 es exactamente igual al de uno *broadcast*. Así, para el diseño y evaluación del protocolo DBMA-PA se utilizó el mismo modelo de propagación que en el capítulo anterior, es decir, el presentado en (Karedal et al., 2011). La TSB implementada en este trabajo está basada el mecanismo MFWAR publicado en (Galaviz-Mosqueda et al., 2012). Sin embargo, el mecanismo de MFWAR ha sido ligeramente modificado para mejorar su desempeño en el enrutamiento *broadcast*.

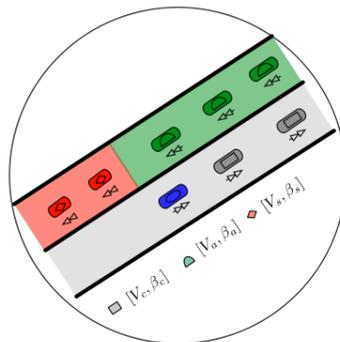


Figura 28. Conformación de los conjuntos a través del mecanismo MFWAR

Cuando un vehículo (x) debe enviar un mensaje, el mecanismo MFWAR agrupa a todos los vehículos que están en la tabla de vecinos en tres conjuntos, V_a, V_c, V_s .

Estos conjuntos son conformados de acuerdo a la dirección de movimiento de cada vecino (ver Figura 28). Esto es, los vecinos que se mueven en dirección opuesta y acercándose a x son agrupados en el conjunto V_a ; los vecinos que se mueven en dirección opuesta a x y alejándose son ubicados en el conjunto V_s ; finalmente, los vehículos que viajan en la misma dirección (convoy) que x son agrupados en el conjunto V_c . Una vez que los vecinos son agrupados en el conjunto que les corresponde (V_a, V_c o V_s) se calcula la distancia hacia a cada uno de ellos y se pondera utilizando 3 factores nombrados $\beta_a, \beta_c, \beta_s$. Estos factores corresponde a cada uno de los conjuntos antes mencionados, i.e. existe un factor β para cada conjunto V , específicamente $[V_a, \beta_a], [V_c, \beta_c], [V_s, \beta_s]$. El objetivo de estos factores es escalar la distancia hacia cada vecino de x , tomado en cuenta las condiciones de propagación presentes en los escenarios tipo carretera modeladas por la Ecuación (1). Finalmente, se elige como siguiente retransmisor al vecino cuya distancia escalada sea la mayor. Es importante mencionar, que ninguno de los factores $\beta_a, \beta_c, \beta_s$ toma el valor de 1, por lo tanto todas las distancias escaladas son menores a las registradas en la tabla de vecinos.

6.3.1 MFWAR con máximo avance

El mecanismo MFWAR fue diseñado como un servicio de localización (SL) para un protocolo de enrutamiento *unicast*. Los mensajes del SL deben diseminarse hacia todas las direcciones y además, una vez encontrado el destino, debe regresar un mensaje desde el destino hasta la fuente para informar de la posición buscada. Por lo tanto, el perder un paquete puede significar repetir todo el proceso de búsqueda, lo que es costoso en términos de tiempo y ancho de banda utilizado. Sin embargo, debido a la naturaleza de las aplicaciones que utilizan el enrutamiento *broadcast*, generalmente los mensajes son enviados solo en una dirección y además, es común que un mismo paquete se envíe varias veces. Por lo tanto, los factores $\beta_a, \beta_c, \beta_s$ pueden tener valores menos restrictivos que permitan un máximo avance en cada salto.

6.3.2 Mecanismo de acuse de recibo implícito

Debido a la naturaleza del canal inalámbrico, sin importar la distancia, no se puede garantizar la entrega de un paquete. Por lo tanto, es deseable un mecanismo que se encargue de retransmitir un paquete en caso de que este no haya alcanzado el vehículo seleccionado como siguiente salto. Con el propósito de no generar mayor sobrecarga, en este trabajo se emplea un acuse de recibo implícito. Es decir, la retransmisión del siguiente salto es tomada como un acuse de recibo. Aunque este mecanismo ha sido usado previamente, por ejemplo en (Wu et al., 2012), el encargado de retransmitir el mensaje en caso de no recibir el acuse de recibo (ack) es el retransmisor primario (RP). Esto, puede ocasionar retransmisiones innecesarias en diferentes casos. Por ejemplo, cuando el RP no escucha el ack proveniente del siguiente salto. Por esto, en la presente propuesta el encargado de retransmitir, en caso de ser necesario, es un nodo ubicado entre el retransmisor primario y el siguiente salto, este nodo es llamado retransmisor secundario o RS. En caso de no existir tal nodo, entonces se elige como retransmisor secundario y original al mismo nodo. El objetivo de elegir un

retransmisor secundario ubicado entre el original y el siguiente salto es permitir que escuche el retransmisor secundario tenga mayor probabilidad de recibir, tanto el mensaje del RP como el del siguiente salto. Por lo tanto, se elige como RS al vehículo más cercano a la mitad de la distancia euclidiana entre el RP y el siguiente salto. De esta manera, en la selección del RS se toma en cuenta implícitamente el impacto del canal en la propagación de la señal inalámbrica.

6.3.3 Algoritmo de predicción

Como se mencionó anteriormente, una de las características que distinguen a las VANETs de otras redes ad-hoc es el patrón de movimiento de los nodos que participan en la red. El cual está sujeto a las vialidades y a las normas que las regulan. Por esto, en DBMA-PA se implementa un algoritmo de predicción de posición previo a la elección tanto del retransmisor secundario como del primario. Este algoritmo es llevado a cabo en 3 pasos, los cuales se explican a continuación:

1. Actualización de la tabla de vecinos: si el tiempo transcurrido desde el último PIT recibido para una entrada, es superior a la suma de los dos últimos temporizadores calculados, entonces dicha entrada se elimina de la tabla de vecinos.
2. La distancia hacia cada vecino es actualizada a través de la Ecuación (5) presentada en la sección 4.1.1, y que se presenta nuevamente a continuación para facilitar la lectura del documento.

$$P_N = P_{act} + (\hat{v} * dt + \hat{acc} * dt^2)$$

Donde P_N es la nueva posición calculada; P_{act} es la posición almacenada en la tabla de vecinos; \hat{v} es la velocidad almacenada en la tabla de vecinos; \hat{acc} es el vector de aceleración almacenada en la tabla de vecinos; y dt es

el tiempo que ha permanecido la entrada almacenada en la tabla de vecinos.

3. La tabla de vecinos actualizada es pasada al algoritmo de selección del siguiente salto.

6.4 Diagramas de flujo

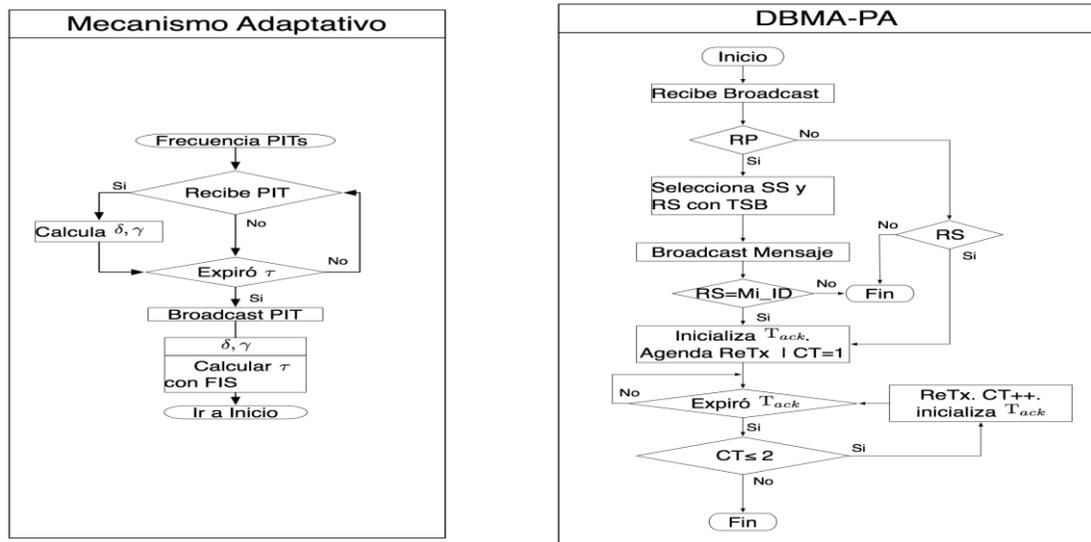


Figura 29. Diagramas de flujo del protocolo de difusión propuesto

Con el propósito de proveer una explicación más clara, en esta sección presentamos los diagramas de flujo correspondientes al algoritmo de diseminación y al mecanismo de emisión de PITs propuestos en este trabajo (ver Figura 29).

6.5 Evaluación del desempeño

En esta sección se muestran las distintas métricas de desempeño obtenidas para DBMA-PA. Con el propósito de validar nuestra propuesta, las métricas obtenidas son comparadas con las obtenidas utilizando FUZZBR (Wu et al., 2012). Específicamente, las métricas obtenidas son: sobrecarga, porcentaje de diseminación y retardo punto a punto. Estas métricas son obtenidas para ambos protocolos a través de simulación realizada en OPNET Modeler. Para la obtención

de las métricas, fue utilizado el modelo de propagación desarrollado ex profeso para comunicaciones V2V (Karedal et al., 2011). Se modificó la implementación provista del estándar IEEE 802.11a para adaptarla a las especificaciones de la capa física y de acceso al medio del estándar enfocado a las redes vehiculares IEEE 802.11p como se describió en la sección 2.8.1 IEEE 802.11p.

6.5.1 Protocolo de referencia

Como se mencionó, en este trabajo se utilizó el protocolo de disseminación llamado FUZZBR como referencia para la evaluación del algoritmo propuesto. FUZZBR fue elegido debido a que es uno de los protocolos asistidos orientados al transmisor que presenta mejores prestaciones. Como se muestra en (Wu et al., 2012) FUZZBR tiene mejor desempeño que la inundación simple, una TSB orientada al receptor no asistida, i.e. p-persistente ponderada (Wisitpongphan, N. et al., 2007), MPR y EMPR. Aún más, FUZZBR considera en su diseño la potencia con que recibe los PITs de cada uno de sus vecinos para la elección del siguiente salto. Lo cual, no es considerado por otros protocolos como EMPR o MPR.

Cada vehículo que implementa el protocolo FUZZBR, registra en la tabla de vecinos tres factores al recibir el PIT proveniente de un vehículo x : la potencia con que se recibió el PIT; un factor de movilidad relacionado con la distancia que recorrió x desde el anterior PIT; y el cociente de la distancia hasta x entre el radio de cobertura nominal. En FUZZBR estos tres factores son combinados a través de un FIS. Los PITs son intercambiados a través de un mecanismo periódico con frecuencia fija. Específicamente, la frecuencia utilizada en FUZZBR es de 1 PIT/s. Con el propósito de realizar una comparación justa, el desempeño de FUZZBR y DBMA-PA fue evaluado bajo el mismo escenario. Ambos protocolos fueron implementados en el simulador OPNET siguiendo los diagramas de flujo presentados en la sección 6.4 para DBMA-PA y las indicaciones provistas en (Wu et al., 2012) para FUZZBR.

6.5.2 Escenario de evaluación

El desempeño de ambos protocolos fue evaluado bajo un escenario tipo carretera, con dos carriles para vehículos circulando en un sentido y otros dos para vehículos circulando en el otro sentido. La longitud de cada carril es de 3Km mientras que el ancho es de 4m. Cuando un vehículo llega al final del carril, es reinsertado en uno de los carriles en sentido contrario. La velocidad máxima permitida para cada vehículo es de 60 m/s. La movilidad de cada vehículo está basada en el modelo de conductor inteligente (IDM por sus siglas en inglés), publicado en (Martin Treiber et al., 2000).

Tabla 10. Parámetros del escenario de evaluación

Parámetro	Valor
Max. Vel.	60 m/s
Densidad	[33,66,100] Vehículos/km
Largo del Carril	3,000 m
Número de Carriles	4
Modelo de Movilidad	IDM
Tamaño del Paquete	512 bytes
Frecuencia	5.880 GHz
Tasa de Datos	6 Mbps
TR	300 mts

Se obtuvieron las métricas de desempeño para el modelo desarrollado específicamente en (Karedal et al., 2011) para comunicaciones V2V. Con el propósito de evaluar la escalabilidad de las propuestas, ambos protocolos fueron evaluados sobre 3 densidades distintas. Específicamente, libre flujo, media y alta. Los valores específicos para estas densidades fueron tomados de (Wang et al., 2011). La adaptación al modelo provisto por OPNET del estándar IEEE 802.11a con una tasa de 6 Mbps, fue utilizada para los transceptores de radio en cada vehículo. Otros parámetros importantes se encuentran en la Tabla 10.

6.5.3 Métricas de desempeño

Tanto el desempeño de DBMA-PA como el de FUZZBR fue evaluado considerando las siguientes métricas:

- Tasa de diseminación del mensaje: Representa el cociente de vehículos que recibe un mensaje entre todos los vehículos que se encuentran en la zona de relevancia.
- Retardo punto a punto: Expresa el tiempo en que el vehículo más alejado dentro de la zona de relevancia recibe el mensaje emitido por la fuente.
- Retransmisiones: Es la cantidad de paquetes por mensaje que se deben retransmitir debido a que el paquete original no alcanzó al retransmisor elegido.
- Número de PITs: es el número de paquetes de información topológica enviados por vehículo por segundo.

6.4.4 Análisis de resultados

6.4.4.1 Resultados considerando la propagación tipo Nakagami

En (Wu et al., 2012) se evalúa el protocolo FUZZBR utilizando el modelo de propagación de Nakagami. Con el propósito de tomarlo como un punto de partida en la Tabla 11 se presenta las métricas obtenidas para la densidad vehicular, λ , de libre flujo, i.e. $\lambda = 33$.

Tabla 11 Métricas obtenidas para DBMA-PA y FUZZBR considerando el modelo de Nakagami en la cama de pruebas.

	DBMA-PA	FUZZBR
TDP	0.978839827	0.962956599
Retransmisiones	2.592259248	5.439018194
PITs	0.273310891	0.904213861
Retardo	0.022886627	0.054416516

Como se puede observar en la Tabla 11, DBMA-PA obtiene un mejor desempeño para las cuatro métricas obtenidas. A pesar de que la TDP es similar, se puede ver fácilmente que el mecanismo de selección de DBMA-PA comete menos errores, pues a pesar de realizar menos retransmisiones obtiene una TDP mayor. Esto, tiene un impacto directo en el retardo, pues al acertar en más ocasiones en la selección del retransmisor primario el paquete se disemina con mayor velocidad.

6.4.4.2 Resultados obtenidos considerando el modelo de propagación para comunicaciones V2V

Esta subsección presenta las métricas obtenidas considerando el canal de propagación desarrollado ex profeso para comunicaciones V2V en escenarios tipo carretera presentado en (Karedal et al., 2011). Es importante recordar que éste modelo si considera que la dirección de los vehículos tiene un efecto importante en la propagación de un mensaje (ver sección 2.3.1.1)

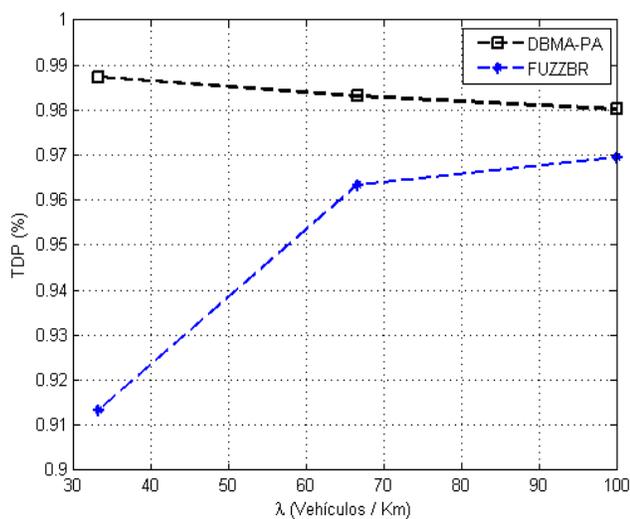


Figura 30 Tasa de diseminación de paquetes (TDP) obtenida para DBMA-PA y FUZZBR cuando se incrementa el valor de la densidad de vehículos, λ .

La Figura 30 presenta la tasa de diseminación de paquetes (TDP) obtenida para FUZZBR y DBMA-PA cuando se incrementa la densidad de nodos, λ . De esta Figura se puede observar que DBMA-PA obtiene un mejor desempeño que

FUZZBR para todas las densidades, λ , evaluadas. Esto es debido a que DBMA-PA si considera los efectos de la dirección de los vehículos en la selección tanto del retransmisor primario como del retransmisor secundario. Adicionalmente, se puede observar que FUZZBR mejora su desempeño conforme aumenta la densidad de vehículos. FUZZBR depende en gran medida de la precisión de la información almacenada en la tabla de vecinos (ver Figura 30) y conforme aumenta la velocidad dicha información pierde relevancia. Así, dado que la velocidad de los vehículos disminuye de manera importante conforme la densidad de vehículos se incrementa, las selecciones de un retransmisor primario fuera del alcance son menores. Por otro lado el TDP de DBMA-PA tiene una pequeña disminución (menor al 1%) conforme se incrementa la densidad, λ . Esto es debido a que DBMA-PA elige como retransmisor primario a vehículos más lejanos, por lo tanto, es más probable que los paquetes colisionen con paquetes de nodos fuera de su rango de sensado.

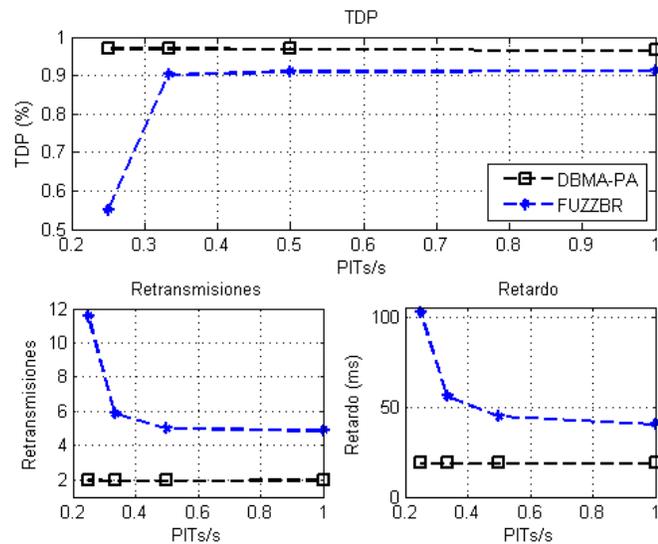


Figura 31 TDP, Número de retransmisiones y retardo obtenidos para DBMA-PA y FUZZBR cuando se disminuye la frecuencia de intercambio de PITs para una densidad de vehículos, $\lambda = 33$.

La Figura 31 muestra las métricas de retardo, TDP y retransmisiones para FUZZBR y DBMA-PA obtenidas conforme se reduce la cantidad de PITs por

segundo que emite cada vehículo. De esta Figura, se puede observar que el desempeño de FUZZBR disminuye conforme la precisión en la información disminuye, es decir cuando se reduce la frecuencia de emisión de PITs. Por otro lado, las métricas obtenidas cuando se considera DBMA para diseminar los mensajes mantienen un buen desempeño a pesar de la disminución en la frecuencia de envío de PITS. Esto es debido a que el algoritmo de predicción implementado en DBMA solventa la imprecisión de la información almacenada en la tabla de vecinos cada vez que se requiere seleccionar un retransmisor.

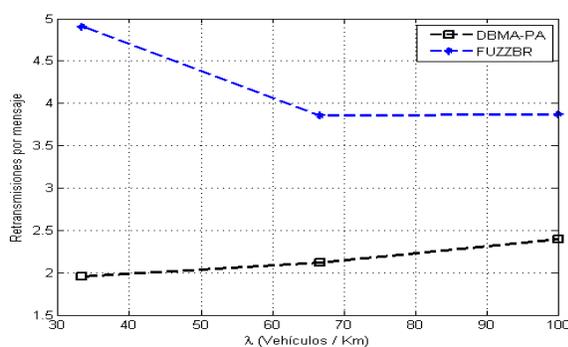


Figura 32 Número de retransmisiones por mensaje de datos obtenida para DBMA-PA y FUZZBR cuando se incrementa el valor de la densidad de vehículos, λ .

La Figura 32 muestra la cantidad de paquetes retransmitidos debido a que los paquetes originales no alcanzaron al retransmisor primario. Para el cálculo de esta métrica solo se consideraron los paquetes que fueron entregados exitosamente. En esta Figura se puede observar que las selecciones del retransmisor primario hechas por DBMA-PA son más adecuadas que las de FUZZBR. Así, el número de retransmisiones por paquete realizadas por DBMA-PA es menor para todas las densidades, λ . Además, se puede observar el número de retransmisiones para DBMA-PA se incrementa levemente con la densidad. Sin embargo, este incremento no impacta de manera importante en las otras métricas de desempeño. Por otro lado, el desempeño de FUZZBR mejora conforme se incrementa la densidad de vehículos, λ , debido al decremento en la velocidad de

los vehículos. No obstante, DBMA-PA presenta mejores resultados para todas las densidades evaluadas.

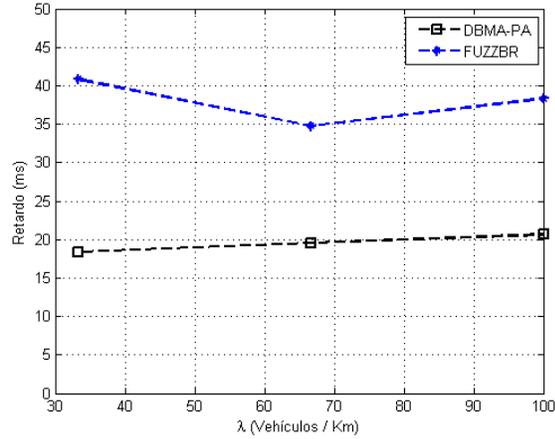


Figura 33 Retardo punto a punto obtenido para DBMA-PA y FUZZBR cuando se incrementa el valor de la densidad de vehículos, λ .

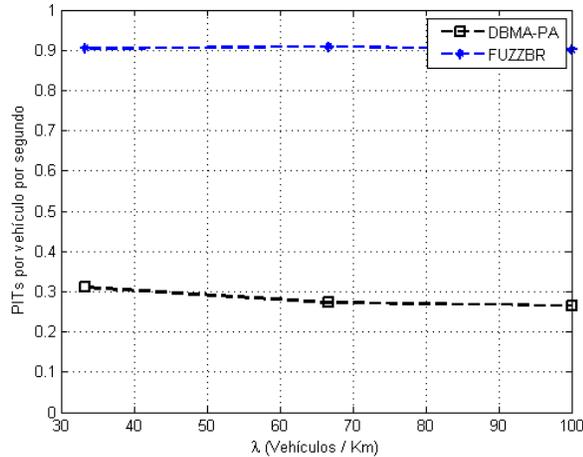


Figura 34 PITs por vehículo por segundo utilizados por DBMA-PA y FUZZBR cuando se incrementa el valor de la densidad de vehículos, λ .

La Figura 33 muestra el retardo promedio entre el vehículo fuente y los receptores al final de la zona de relevancia para distintas densidades de vehículos λ . Para el cálculo de esta métrica solo se consideraron los paquetes que fueron entregados exitosamente. FUZZBR realiza un mayor número de selecciones incorrectas, y por lo tanto retransmisiones (ver Figura 30). Adicionalmente, la carga introducida por

el mecanismo de intercambio de PITS se incrementa con la densidad de vehículos. Así, la contención por el acceso al medio es mayor y como consecuencia FUZZBR presenta un retardo mayor al que es obtenido cuando se considera DBMA-PA en la disseminación de los mensajes.

Finalmente, la Figura 34 muestra la cantidad de PITS emitidos por cada vehículo para distintas densidades de vehículos, λ . Dado que para FUZZBR se utiliza una frecuencia fija, la cantidad de PITS enviados permanece sin cambio para todas las densidades de vehículos. Por otro lado, el mecanismo adaptativo de DBMA ajusta la cantidad de paquetes de acuerdo a la velocidad y densidad de vehículos. Es importante mencionar que el algoritmo de predicción implementado en DBMA-PA permite que la frecuencia de intercambio de PITS se notablemente menor a la de FUZZBR sin afectar la tasa de disseminación de paquetes.

6.4.4.3 Conclusiones

En este capítulo se introdujo un nuevo protocolo de disseminación llamado disseminación *broadcast* por Máximo avance, con un mecanismo de intercambio de PITS adaptativo (DBMA-PA). El diseño de ambos algoritmos fue enfocado a escenarios tipo carretera. El desempeño de DBMA-PA fue comparado con el desempeño de FUZZBR, uno de los pocos protocolos que considera la potencia de los PITS recibidos en su diseño. Cuando se consideran las condiciones de propagación para las comunicaciones V2V en escenarios tipo carreta, DBMA-PA obtiene un mejor desempeño que FUZZBR. Esto es debido a que DBMA-PA incluye en su diseño diversos mecanismos que ayudan a contrarrestar las pérdidas de paquetes ocasionadas por las condiciones presentes en los escenarios tipo carretera. Específicamente, el mecanismo de selección del siguiente salto permite un máximo avance donde es posible. Cuando los efectos del canal radio son tan severos como para provocar la pérdida del paquete original, el mecanismo de retransmisión permite que el paquete se siga disseminando a lo largo de la zona relevancia. Aún más, los resultados de

simulación obtenidos muestran que implementar un algoritmo de predicción es vital para disminuir la frecuencia de intercambio de PITs sin afectar de manera importante la tasa de entrega de paquetes. Es importante remarcar que el mecanismo de selección y la baja sobrecarga introducido por DBMA-PA entrega buenos resultados. Esto puede inferirse observando los resultados obtenidos en la métrica de retardo, la cual es considerablemente menor para DBMA-PA que para FUZZBR. De esta manera, de los resultados presentados en la sección anterior, se puede establecer que para mejorar el desempeño de los algoritmos de difusión *broadcast* se debe considerar en su diseño las condiciones de propagación. Adicionalmente, con el propósito de reducir la frecuencia de intercambio de PITs en un escenario tipo carretera, es fundamental la implementación de un algoritmo de predicción. En este contexto, los resultados muestran que DBMA-PA es un protocolo viable para VANETs desplegadas en carreteras. Esto, debido a que ofrece ventajas respecto a otros algoritmos enfocados al transmisor como EMPR al considerar en su diseño las condiciones de propagación. Adicionalmente, DBMA-PA ofrece ventajas comparado con FUZZBR, como la implementación de un algoritmo de predicción y un mecanismo para adaptar la frecuencia de intercambio de PITs. Para este trabajo, los parámetros β fueron elegidos de acuerdo a las condiciones de los diferentes escenarios. Sin embargo, un mecanismo para adaptar estos parámetros a las condiciones instantáneas del vecindario podría redundar en una disminución del retardo y del número de retransmisiones. Por lo tanto, como trabajo futuro adaptaremos el mecanismo de PITs adaptativo con el propósito de que cada vehículo adapte los parámetros β de manera independiente.

6.5 Resumen

En este capítulo se presentaron los detalles del diseño de los módulos para un nuevo algoritmo de diseminación de mensajes *broadcast* para comunicaciones V2V desplegadas en escenarios tipo carretera. Adicionalmente, se presentó la evaluación del protocolo introducido llamado DBMA-PA comparándolo con uno de

los protocolos más eficientes para la disseminación de mensajes *broadcast*, i.e. FUZZBR. Los resultados para ambos protocolos fueron obtenidos considerando el canal de propagación desarrollado ex profeso para las comunicaciones V2V en escenarios tipo carretera introducido en (Karedal et al., 2011). De estos resultados se puede observar que con el propósito de permitir una frecuencia de intercambio de PITs menor, y por lo tanto menor sobrecarga, es importante utilizar un algoritmo de predicción para actualizar la posición almacenada en la tabla de vecinos. Adicionalmente, se presentó una revisión de la literatura de los mecanismos de intercambio de PITs adaptativos para contextualizar el diseño del mecanismo adaptativo de PITs que se introdujo en esta sección. De los resultados obtenidos se puede establecer que la utilización del mecanismo adaptativo no afecta de manera negativa a la TDP del protocolo DBMA-PA.

Capítulo 7

Conclusiones y trabajo futuro

Este capítulo concluye la investigación realizada y resume las contribuciones más importantes del mismo. Adicionalmente, se presentan líneas de investigación relacionadas a la presente tesis que pueden ser exploradas a futuro.

La investigación realizada en este trabajo se enfoca principalmente en el diseño de estrategias de enrutamiento para redes vehiculares ad-hoc desplegadas en escenarios tipo carretera. Este tipo de redes han sido identificadas como la tecnología capaz de incrementar radicalmente la seguridad y confort de los pasajeros y conductores de los vehículos. Sin embargo, este tipo de redes representan un reto mayúsculo para los protocolos de enrutamiento. Esto, debido a que las características de movilidad de los vehículos y las condiciones de propagación de una señal generan una topología altamente dinámica. Por esta razón, el trabajo realizado considera los efectos del canal radio y la movilidad de los vehículos sobre la propagación de un mensaje en el diseño de una estrategia de enrutamiento.

7.1 Conclusiones

De manera resumida, la problemática ocasionada por la movilidad fue abordada introduciendo un algoritmo de predicción de posición que contribuyó a reducir el error existente en la información almacenada en la tabla de vecinos. Por otro lado, las pérdidas de paquetes ocasionadas por las condiciones de propagación fueron mitigadas realizando la selección del siguiente salto de una manera novedosa con respecto a las estrategias de enrutamiento existentes en el estado del arte. Específicamente, se acoto el radio de transmisión nominal de acuerdo al comportamiento del canal inalámbrico presente en las comunicaciones vehículo a vehículo llevadas a cabo en escenarios tipo carretera. Estas consideraciones (de

movilidad y de las condiciones de propagación) fueron realizadas en un nuevo algoritmo de selección del siguiente salto llamado MFWAR. Este algoritmo fue utilizado como base para el diseño de un protocolo de enrutamiento *broadcast* así como para el diseño de un algoritmo de enrutamiento *unicast*. Así, las conclusiones más importantes en el contexto de los algoritmos *unicast* son presentadas en la sección 7.1.1. Las conclusiones realizadas en el contexto de los algoritmos de enrutamiento *broadcast* son presentadas en la sección 7.1.2.

7.1.1 Conclusiones sobre el diseño de algoritmos de enrutamiento *unicast*

- Debido a la poca o nula infraestructura disponible en los escenarios tipo carretera es necesario que se considere un servicio de localización para que el algoritmo de enrutamiento sea totalmente independiente. Por lo tanto, la evaluación del protocolo de enrutamiento debe ser realizada incluyendo los efectos del servicio de localización.
- Diseñando un mecanismo relativamente simple para ajustar el radio de cobertura dependiendo de la dirección relativa de los vehículos vecinos se puede diseñar una estrategia para seleccionar como siguiente salto a un vehículo que tenga una mayor probabilidad de recibir el paquete. Comparando el desempeño de los protocolos evaluados obtenido para los dos diferentes modelos de propagación en el capítulo 5, se puede concluir que no considerar los efectos del canal radio en la selección del siguiente salto puede ocasionar un número significativo de pérdidas y de retransmisiones, tanto de paquetes del servicio de localización como de paquetes de datos.
- Considerar como siguiente salto a un vehículo cerca del radio de cobertura nominal aumenta la probabilidad de perder el paquete generando la retransmisión del paquete. Por esta razón, considerar el radio de cobertura nominal en el diseño de un algoritmo de enrutamiento incrementa la contención por el acceso al medio y, por lo tanto, el retardo punto a punto

también es incrementado. Esto se puede observar en las gráficas del retardo por salto obtenidas para los protocolos evaluados en el capítulo 4.

- Utilizar el mecanismo RTS/CTS del estándar IEEE 802.11 reduce el problema de la terminal escondida. Sin embargo, en un canal de comunicaciones como el vehicular, un paquete puede perderse fácilmente. En este contexto es importante mencionar que si un paquete del mecanismo RTS/CTS se pierde debe ser retransmitido. Así, la implementación del mecanismo RTS/CTS puede incrementar de manera importante la sobrecarga generada por el protocolo de enrutamiento en la capa de acceso al medio como lo muestra la gráfica correspondiente presentada en el capítulo 5. Por lo tanto, si el mecanismo de RTS/CTS es utilizado, además de la sobrecarga en red generada por el protocolo de enrutamiento, es necesario contabilizar la sobrecarga generada en la capa de acceso al medio.
- Como puede ser observado en las gráficas de tasa de entrega de paquetes y de retardo punto a punto obtenido para FPBR, considerar los efectos del canal radio en el diseño de la estrategia de enrutamiento permite mantener un buen desempeño del protocolo aun en las difíciles condiciones impuestas por los escenarios vehiculares.
- FPBR considera las condiciones existentes en el canal radio para seleccionar el siguiente salto. Sin embargo, aún pueden existir pérdidas debido a una pérdida por propagación más grande de lo esperado o la interferencia con otras señales. Por lo tanto, es necesario implementar una estrategia de retransmisión para incrementar la probabilidad de que el paquete siga su trayecto hacia el destino.
- El mecanismo de acuse de recibo implícito implementado en FPBR y la selección de un nodo de respaldo, ayudan a resolver la mayor parte de las pérdidas de paquetes que pudieran suceder en la diseminación de los paquetes del servicio de localización. Esto, sin generar una sobrecarga que perjudique el desempeño de FPBR.

7.1.2 Conclusiones sobre el diseño de algoritmos de enrutamiento *broadcast*

- Considerar los efectos del canal radio en el diseño del protocolo de enrutamiento *broadcast*, incrementa la tasa de diseminación de paquetes como se muestra en la gráfica correspondiente presentada en el capítulo 5.
- Como puede ser observado en la Figura 30, introducir un algoritmo de predicción de posición en la selección del siguiente salto permite utilizar una frecuencia de envío de paquetes de información topológica más baja. Por lo tanto, la sobrecarga generada por el protocolo de enrutamiento puede ser menor que cuando no se considera un algoritmo para predecir la posición.
- La gráfica de la Figura 32 muestra que en el protocolo propuesto (DBMA-PA) el número de retransmisiones es menor que el del protocolo de referencia. Por lo tanto, es posible inferir que si se consideran los efectos de la propagación, se pueden realizar mejores selecciones del siguiente salto. Esto, genera una menor contención por el acceso al medio debido a que se ofrece una menor sobrecarga y a que se disminuye el número de retransmisiones.
- Como lo muestran las gráficas de las Figuras (30-34), el introducir un mecanismo para adaptar la frecuencia de envío de paquetes en el protocolo propuesto la sobrecarga introducida es menor que utilizando una frecuencia de intercambio fija y se mantiene la efectividad en la tasa de diseminación de paquetes y el retardo.

7.2 Contribuciones

La investigación realizada condujo a una serie de contribuciones al estado del arte, además, se reflejó en una publicación y en la obtención de un conjunto de resultados con un potencial relevante para ser publicados a corto plazo. Las principales contribuciones de este trabajo de tesis se muestran a continuación:

- A través de los resultados obtenidos para ambos protocolos propuestos, se demostró que considerar los efectos del canal radio al seleccionar el siguiente salto permite implementar protocolos que se adaptan a las condiciones presentes en escenarios vehiculares tipo carretera.
- Se diseñó y evaluó un nuevo algoritmo de selección del siguiente salto llamado MFWAR, el cual, considera los efectos del canal radio. Este mecanismo permitió reducir de manera significativa las retransmisiones necesarias y por lo tanto, el retardo y la sobrecarga del protocolo de enrutamiento.
- Basado en el mecanismo MFWAR se diseñó un nuevo protocolo de enrutamiento *unicast* llamado FPBR enfocado a escenarios tipo carretera. Las tasa de entrega de paquetes, el retardo punto a punto y las demás métricas obtenidas para FPBR muestran que aún bajo las difíciles condiciones de movilidad y propagación presentes en escenarios vehiculares tipo carretera, FPBR tiene un desempeño sobresaliente.
- Se diseñó un nuevo mecanismo para adaptar la frecuencia de envío de paquetes de información topológica basado en la velocidad y la densidad del vehículo. Este mecanismo, fue integrado y evaluado en el contexto de un protocolo de enrutamiento *broadcast*. La tasa de diseminación de paquetes obtenida por DBMA-PA muestra que el mecanismo de PITs adaptativo no tiene un efecto negativo. Además, tiene la ventaja de que la sobrecarga generada se disminuye con respecto a cuándo se utiliza una frecuencia de envío fija.
- Se adaptó el mecanismo MFWAR para implementarlo como una nueva técnica de supresión de *broadcast* (TSB). Basándose en esta TSB y el mecanismo de PITs adaptativo, se diseñó y evaluó un nuevo algoritmo de enrutamiento *broadcast* llamado DBMA-PA. La tasa de diseminación de paquetes, la sobrecarga generada y el retardo obtenido para DBMA-PA muestran que la TSB logra entregar los paquetes a la mayor parte de los

vehículos dentro de la zona de relevancia. Esto, con un número menor de paquetes de control con respecto al protocolo de referencia.

7.3 Trabajo futuro

Los resultados obtenidos, en conjunto con las conclusiones hechas en este capítulo permitieron identificar varias líneas de trabajo que pueden tomar como base la investigación hecha en esta tesis.

En éste trabajo los parámetros β fueron elegidos considerando el desempeño general para diferentes densidades. El desempeño de FPBR y DBMA-PA puede mejorar en términos de retardo y número de retransmisiones si los parámetros β son adaptados para diferentes condiciones de tráfico.

El mecanismo MFWAR puede ser adaptado para escenarios urbanos, sin embargo, se deben obtener los parámetros β específicos para este tipo de escenarios a través del estudio de las condiciones de propagación en este tipo de escenarios.

Adaptar el ancho de las membresías del mecanismo de envío de paquetes presentado en el capítulo 6. Las membresías para el sistema de inferencia difuso del mecanismo que adapta la frecuencia de envío de los PITs fueron determinadas basándose en las características de los escenarios tipo carretera. Adaptar las membresías a las condiciones presentes en otro tipo de escenarios permitiría mantener la precisión necesaria en la tabla de vecinos. Aún más, el mecanismo de envío de PITs puede tener un mejor funcionamiento si el ancho de las membresías es determinado para cada escenario a través de un método de optimización.

Evaluar FPBR, DBMA-PA y los protocolos de referencia considerando diferentes prioridades de tráfico. En este trabajo los protocolos de enrutamiento fueron evaluados considerando un solo tipo de tráfico como en el trabajo realizado en (Iqbal et al., 2011) para el análisis de AODV y DSR cuando se utilizan

transceptores de radio IEEE 802.11p. Por lo tanto, la evaluación de los protocolos de enrutamiento considerando distintos tipos de flujos de tráfico con el propósito de enfocar los protocolos propuestos a una aplicación en específico.

Referencias bibliográficas

A. Mahajan, N. Potnis, K. Gopalan, & A. Wang. (2006). Evaluation of Mobility Models For Vehicular Ad-Hoc Network Simulations. Presented at the IEEE International Workshop on Next Generation Wireless Networks (WoNGeN 2006), Bangalore, India.

Abdel Hafeez, K., Zhao, L., Liao, Z., & Ma, B. (2011). Clustering and OFDMA-based MAC protocol (COMAC) for vehicular ad hoc networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2011(1), 117. doi:10.1186/1687-1499-2011-117.

Abedi, O., Fathy, M., & Taghiloo, J. (2008). Enhancing AODV routing protocol using mobility parameters in VANET (pp. 229–235). Presented at the Computer Systems and Applications, 2008. AICCSA 2008. IEEE/ACS International Conference on. doi:10.1109/AICCSA.2008.4493539.

Acosta-Marum, G., & Ingram, M. A. (2007a). Six Time- and Frequency-Selective Empirical Channel Models for Vehicular Wireless LANs (pp. 2134–2138). Presented at the Vehicular Technology Conference, 2007. VTC-2007 Fall. 2007 IEEE 66th. doi:10.1109/VETEFCF.2007.448.

Acosta-Marum, G., & Ingram, M. A. (2007b). Six Time- and Frequency-Selective Empirical Channel Models for Vehicular Wireless LANs (pp. 2134–2138). Presented at the Vehicular Technology Conference, 2007. VTC-2007 Fall. 2007 IEEE 66th. doi:10.1109/VETEFCF.2007.448.

Amoroso, A., Marfia, G., & Rocchetti, M. (2011). Going realistic and optimal: A distributed multi-hop broadcast algorithm for vehicular safety. *Computer Networks*, 55(10), 2504–2519. doi:10.1016/j.comnet.2011.04.011.

Aquino Santos, R., Block, A. E., & Rangel Licea, V. (Eds.). (2012). *Wireless technologies in vehicular ad hoc networks: present and future challenges*. Hershey, PA: Information Science Reference.

Aquino-Santos, R., Rangel-Licea, V., Edwards, A., Garcia-Ruiz, M. A., & Eduardo. (2010). Analyzing IEEE 802.11g and IEEE 802.16e Technologies for Single-hop Inter-vehicle Communications. In M. Watfa & A. Mendez (Eds.), *Advances in vehicular ad-hoc networks: developments and challenges* (pp. 120–148). Hershey, PA: Information Science Reference.

Aquino-Santos, R., Rangel-Licea, V., Garcia-Ruiz, M. A., Gonzalez-Potes, A., Alvarez-Cardenas, O., Edwards-Block, A., Sandoval-Carrillo, S. (2009). Inter-

Vehicular Communications Using Wireless Ad Hoc Networks. In H. Guo (Ed.), *Automotive informatics and communicative systems: principles in vehicular networks and data exchange* (pp. 120–138). Hershey Pa: Information Science Reference.

Baccelli, E., Jacquet, P., Mans, B., & Rodolakis, G. (2012). Highway Vehicular Delay Tolerant Networks: Information Propagation Speed Properties. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 58, 1743–1756.

Bai, F., Sadagopan, N., & Helmy, A. (2003). The IMPORTANT framework for analyzing the Impact of Mobility on Performance Of Routing protocols for Adhoc Networks. *Ad Hoc Networks*, 1(4), 383–403. doi:10.1016/S1570-8705(03)00040-4.

Bakhouya, M., Gaber, J., & Lorenz, P. (2011). An adaptive approach for information dissemination in Vehicular Ad hoc Networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 34(6), 1971–1978. doi:10.1016/j.jnca.2011.06.010.

Barradi, M., Hafid, A. S., & Gallardo, J. R. (2010). Establishing Strict Priorities in IEEE 802.11p WAVE Vehicular Networks (pp. 1–6). IEEE. doi:10.1109/GLOCOM.2010.5683147.

Baumann, R., Legendre, F., & Sommer, P. (2008). Generic mobility simulation framework (GMSF) (p. 49). ACM Press. doi:10.1145/1374688.1374698.

Behnad, A., & Nader-Esfahani, S. (2011). On the Statistics of MFR Routing in One-Dimensional Ad Hoc Networks. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 60(7), 3276–3289. doi:10.1109/TVT.2011.2162655.

Benslimane, A., Barghi, S., & Assi, C. (2011). Fast track article: An efficient routing protocol for connecting vehicular networks to the Internet. *Pervasive Mob. Comput.*, 7(1), 98–113. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.pmcj.2010.09.002

Bernsen, J., & Manivannan, D. (2009). Unicast routing protocols for vehicular ad hoc networks: A critical comparison and classification. *Pervasive and Mobile Computing*, 5(1), 1–18. doi:10.1016/j.pmcj.2008.09.001.

Bilal, S. M., Bernardos, C. J., & Guerrero, C. (2013). Position-based routing in vehicular networks: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 36(2), 685–697. doi:10.1016/j.jnca.2012.12.023.

CANU Project Home Page. (n.d.). <http://canu.informatik.uni-stuttgart.de>.

Chaurasia, B. K., Tomar, R. S., Verma, S., & Tomar, G. S. (2012). Suitability of MANET Routing Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks. In *Communication*

Systems and Network Technologies (CSNT), 2012 International Conference on (pp. 334 –338). doi:<http://dx.doi.org/10.1109/CSNT.2012.78>.

Cheng, L., Henty, B. E., Bai, F., & Stancil, D. D. (2008). Highway and rural propagation channel modeling for vehicle-to-vehicle communications at 5.9 GHz. In *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008. AP-S 2008. IEEE* (pp. 1 –4). doi:<http://dx.doi.org/10.1109/APS.2008.4619037>.

Chu, Y.-C., & Huang, N.-F. (2012). An Efficient Traffic Information Forwarding Solution for Vehicle Safety Communications on Highways. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 13, 1524–9050.

Daenabi, A., Pour Rahbar, A. G., & Khademzadeh, A. (2011). VWCA: An efficient clustering algorithm in vehicular ad hoc networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 34(1), 207–222. doi:10.1016/j.jnca.2010.07.016.

David B. Johnson, & David A. Maltz. (1996). Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In *Mobile Computing* (Imielinski and Korth., Vol. 353). Kluwer Academic Publishers.

Dressler, F., Sommer, C., Eckhoff, D., & Tonguz, O. K. (2011). Toward Realistic Simulation of Intervehicle Communication. *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, 6(3), 43–51. doi:10.1109/MVT.2011.941898.

Fernández-Caramés, T. M., González-López, M., & Castedo, L. (2011a). Mobile WiMAX for vehicular applications: Performance evaluation and comparison against IEEE 802.11p/a. *Computer Networks*, 55(16), 3784–3795. doi:10.1016/j.comnet.2011.02.016.

Fernández-Caramés, T. M., González-López, M., & Castedo, L. (2011b). Mobile WiMAX for vehicular applications: Performance evaluation and comparison against IEEE 802.11p/a. *Computer Networks*, 55(16), 3784 – 3795. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2011.02.016>.

Fonseca, Antnio, & Vazao, T. (2012a). Applicability of position-based routing for VANET in highways and urban environment. *Journal of Network and Computer Applications*. doi:10.1016/j.jnca.2012.03.009.

Fonseca, Antnio, & Vazao, T. (2012b). Applicability of position-based routing for VANET in highways and urban environment. *Journal of Network and Computer Applications*. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2012.03.009>.

Fonseca, António, & Vazão, T. (2012). Applicability of position-based routing for VANET in highways and urban environment. *Journal of Network and Computer Applications*. doi:10.1016/j.jnca.2012.03.009.

Galaviz-Mosqueda, G., Aquino-Santos, R., Villarreal-Reyes, S., Rivera-Rodríguez, R., Villaseñor-González, L., & Edwards, A. (2012). Reliable Freestanding Position-Based Routing in Highway Scenarios. *Sensors*, 12(11), 14262–14291. doi:10.3390/s121114262.

Garelli, L., Casetti, C., Chiasserini, C.-F., & Fiore, M. (2011). MobSampling: V2V Communications for Traffic Density Estimation. In *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd* (pp. 1–5). doi:http://dx.doi.org/10.1109/VETECS.2011.5956223.

Ghafoor, K. Z., Bakar, K. A., Van Eenennaam, E. M., Khokhar, R. H., & Gonzalez, A. J. (2011). A fuzzy logic approach to beaconing for vehicular ad hoc networks. *Telecommunication Systems*, 1–11.

Gipps, P. G. (1981). A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 15(2), 105–111. doi:10.1016/0191-2615(81)90037-0.

Gozalvez, J., Sepulcre, M., & Bauza, R. (2010a). Impact of the radio channel modelling on the performance of VANET communication protocols. *Telecommunication Systems*, 1–19.

Gozalvez, J., Sepulcre, M., & Bauza, R. (2010b). Impact of the radio channel modelling on the performance of VANET communication protocols. *Telecommunication Systems*, 1–19.

Guo, D., Liu, Y., Li, X., & Yang, P. (2010). False Negative Problem of Counting Bloom Filter. *Knowledge and Data Engineering, IEEE Transactions on*, 22(5), 651–664. doi:10.1109/TKDE.2009.209

Han, C., Dianati, M., Tafazolli, R., Kernchen, R., & Shen, X. (2012). Analytical Study of the IEEE 802.11p MAC Sublayer in Vehicular Networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(2), 873–886. doi:10.1109/TITS.2012.2183366

Harri, J., Filali, F., & Bonnet, C. (2009). Mobility models for vehicular ad hoc networks: a survey and taxonomy. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 11(4), 19–41. doi:10.1109/SURV.2009.090403

IEEE. (2010a). P802.11p-2010: Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments.

IEEE. (2010b). P802.11p-2010: Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments. doi:10.1109/IEEESTD.2010.

Inoue, T., Nakata, H., Itami, M., & Itoh, K. (2004). An analysis of incident information transmission performance using an IVC system that assigns PN codes to the locations on the road. In *Intelligent Vehicles Symposium, 2004 IEEE* (pp. 115 – 120). doi:http://dx.doi.org/10.1109/IVS.2004.1336366.

Iqbal, M., Wang, F., Xu, X., Eljack, S., & Mohammad, A. (2011). Reactive routing evaluation using modified 802.11a with realistic vehicular mobility. *Annals of Telecommunications, 66*, 643–656.

Isento, J. N., Dias, J. A., Neves, J. C., Soares, V. N. G. J., Rodrigues, J. J. P. C., Nogueira, A. M. D., & Salvador, P. (2011). FTP@VDTN; A file transfer application for Vehicular Delay-Tolerant Networks. In *EUROCON - International Conference on Computer as a Tool (EUROCON), 2011 IEEE* (pp. 1 –4). doi:http://dx.doi.org/10.1109/EUROCON.2011.5929349.

Jerbi, M., Senouci, S.-M., Rasheed, T., & Ghamri-Doudane, Y. (2009). Towards Efficient Geographic Routing in Urban Vehicular Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology, 58*, 5048–5059. doi:10.1109/TVT.2009.2024341.

Karagiannis, G., Altintas, O., Ekici, E., Heijenk, G., Jarupan, B., Lin, K., & Weil, T. (2011). Vehicular Networking: A Survey and Tutorial on Requirements, Architectures, Challenges, Standards and Solutions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials, 13*(4), 584–616. doi:10.1109/SURV.2011.061411.00019.

Karedal, J., Czink, N., Paier, A., Tufvesson, F., & Molisch, A. F. (2011). Path Loss Modeling for Vehicle-to-Vehicle Communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology, 60*, 323–328. doi:10.1109/TVT.2010.2094632.

Karp, B., & Kung, H. T. (2000). GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks (pp. 243–254). Presented at the Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking, ACM. doi:10.1145/345910.345953.

Kenney, J. B. (2011). Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Standards in the United States. *Proceedings of the IEEE, 99*(7), 1162–1182. doi:10.1109/JPROC.2011.2132790.

Kerner, B. S. (2004). *The physics of traffic: empirical freeway pattern features, engineering applications, and theory*. Berlin: Springer..

Khodayari, A., Ghaffari, A., Kazemi, R., & Braunstingl, R. (2012). A Modified Car-Following Model Based on a Neural Network Model of the Human Driver Effects. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 42(6), 1440–1449. doi:10.1109/TSMCA.2012.2192262.

Kihl, M., Sichitiu, M., Ekeroth, T., & Rozenberg, M. (2007). Reliable Geographical Multicast Routing in Vehicular Ad-Hoc Networks. In F. Boavida, E. Monteiro, S. Mascolo, & Y. Koucheryavy (Eds.), *Wired/Wireless Internet Communications* (Vol. 4517, pp. 315–325). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Retrieved from http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-3-540-72697-5_27.

Krauss, S., Wagner, P., & Gawron, C. (1997). Metastable states in a microscopic model of traffic flow. *Physical Review E*, 55(5), 5597–5602. doi:10.1103/PhysRevE.55.5597.

Kuhn, T., & De Irigon, J. I. (2007). An experimental evaluation of black burst transmissions (p. 163). ACM Press. doi:10.1145/1298091.1298121.

Kun Yang, Shumao Ou, Hsiao-Hwa Chen, & Jianghua He. (2007). A Multihop Peer-Communication Protocol With Fairness Guarantee for IEEE 802.16-Based Vehicular Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56(6), 3358–3370. doi:10.1109/TVT.2007.906875.

Kunisch, J., & Pamp, J. (2008). Wideband Car-to-Car Radio Channel Measurements and Model at 5.9 GHz (pp. 1–5). Presented at the Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. IEEE 68th. doi:10.1109/VETEFCF.2008.64.

Lee, K. C., Lee, U., & Gerla, M. (2009a). TO-GO: TOpology-assist geo-opportunistic routing in urban vehicular grids (pp. 11–18). Presented at the Wireless On-Demand Network Systems and Services, 2009. WONS 2009. Sixth International Conference on. doi:10.1109/WONS.2009.4801842.

Lee, K. C., Lee, U., & Gerla, M. (2009b). TO-GO: TOpology-assist geo-opportunistic routing in urban vehicular grids (pp. 11–18). Presented at the Wireless On-Demand Network Systems and Services, 2009. WONS 2009. Sixth International Conference on. doi:10.1109/WONS.2009.4801842.

- Li, F., & Wang, Y. (2007). Routing in vehicular ad hoc networks: A survey. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2(2), 12–22. doi:10.1109/MVT.2007.912927
- Li, Y., Ying, K., Cheng, P., Yu, H., & Luo, H. (2012). Cooperative data dissemination in cellular-VANET heterogeneous wireless networks (pp. 1–4). IEEE. doi:10.1109/HSIC.2012.6212991.
- Liu, C., & Chigan, C. (2012). RPB-MD: Providing robust message dissemination for vehicular ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 10(3), 497–511. doi:10.1016/j.adhoc.2011.09.003.
- Mamdani. (1977). Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis. *IEEE Transactions on Computers*, C-26(12), 1182–1191. doi:10.1109/TC.1977.1674779.
- Mariyasagayam, M. N., Menouar, H., & Len, M. (2008). GeoNet: A project enabling active safety and IPv6 vehicular applications (pp. 312–316). IEEE. doi:10.1109/ICVES.2008.4640897.
- Mecklenbrauker, C. F., Molisch, A. F., Karedal, J., Tufvesson, F., Paier, A., Bernado, L., ... Czink, N. (2011). Vehicular Channel Characterization and Its Implications for Wireless System Design and Performance. *Proceedings of the IEEE*, 99, 1189–1212. doi:10.1109/JPROC.2010.2101990.
- Milanés, V., Pérez, J., Godoy, J., & Onieva, E. (2012). A fuzzy aid rear-end collision warning/avoidance system. *Expert Systems with Applications*, 39(10), 9097–9107. doi:10.1016/j.eswa.2012.02.054.
- Milanes, V., Villagra, J., Godoy, J., Simo, J., Perez, J., & Onieva, E. (2012). An Intelligent V2I-Based Traffic Management System. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 13(1), 49–58. doi:10.1109/TITS.2011.2178839.
- Misić, J., Badawy, G., & Misić, V. B. (2011). Performance Characterization for IEEE 802.11p Network With Single Channel Devices. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 60(4), 1775–1787. doi:10.1109/TVT.2011.2116052.
- Mizutani, K., & Kohno, R. (2001). Inter-vehicle spread spectrum communication and ranging system with concatenated EOE sequence. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 2(4), 180–191. doi:http://dx.doi.org/10.1109/6979.969363.
- Molisch, A., Tufvesson, F., Karedal, J., & Mecklenbrauker, C. (2009). A survey on vehicle-to-vehicle propagation channels. *Wireless Communications, IEEE*, 16(6), 12–22. doi:10.1109/MWC.2009.5361174.

Muñoz, D., Rodriguez, R., & Villarreal-Reyes, S. (2012). Channel Impairments for V2V Communications in ITS Scenarios. In R. Aquino Santos, A. E. Block, & V. Rangel Licea (Eds.), *Wireless technologies in vehicular ad hoc networks: present and future challenges*. Hershey, PA: Information Science Reference.

Nagel, K., & Schreckenberg, M. (1992). A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, 2(12), 2221–2229. doi:10.1051/jp1:1992277.

Naumov, V., & Gross, T. R. (2007). Connectivity-Aware Routing (CAR) in Vehicular Ad-hoc Networks. Presented at the 126th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM). doi:10.1109/INFCOM.2007.223.

Naumov, V., R., B., & T., G. (2006). An Evaluation of Inter-Vehicle Ad Hoc Networks Based on Realistic Vehicular Traces. Presented at the Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing (MobiHoc).

Paier, A., Karedal, J., Czink, N., Dumard, C., Zemen, T., Tufvesson, F., Mecklenbrauker, C. (2009). Characterization of Vehicle-to-Vehicle Radio Channels from Measurements at 5.2–5.8 GHz. *Wireless Personal Communications*, 50, 19–32.

Panichpapiboon, S., & Pattara-atikom, W. (2008). Evaluation of a neighbor-based vehicle density estimation scheme (pp. 294–298). Presented at the ITS Telecommunications, 2008. ITST 2008. 8th International Conference on. doi:10.1109/ITST.2008.4740274.

Panichpapiboon, Sooksan, & Pattara-atikom, W. (2011). A Review of Information Dissemination Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. doi:10.1109/SURV.2011.070711.00131.

Pasolini, G., & Verdone, R. (2002). Bluetooth for ITS? In *Wireless Personal Multimedia Communications, 2002. The 5th International Symposium on* (Vol. 1, pp. 315 – 319 vol.1). doi:http://dx.doi.org/10.1109/WPMC.2002.1088184

Perkins, C. E., & Royer, E. M. (1999). Ad-hoc on-demand distance vector routing. Presented at the Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. (WMCSA). doi:10.1109/MCSA.1999.749281.

Qayyum, A., Viennot, L., & Laouiti, A. (2002). Multipoint relaying for flooding broadcast messages in mobile wireless networks (pp. 3866–3875). *IEEE Comput. Soc.* doi:10.1109/HICSS.2002.994521.

Radu Popescu-Zeletin, I. R. (2010). *Vehicular-2-X Communication: State-Of-The-Art and Research in Mobile Vehicular Ad Hoc Networks*. Springer Berlin.

Rao, S. A., Pai, M., Boussedjra, M., & Mouzna, J. (2008a). GPSR-L: Greedy perimeter stateless routing with lifetime for VANETS (pp. 299–304). Presented at the ITS Telecommunications, 2008. ITST 2008. 8th International Conference on. doi:10.1109/ITST.2008.4740275.

Rao, S. A., Pai, M., Boussedjra, M., & Mouzna, J. (2008b). GPSR-L: Greedy perimeter stateless routing with lifetime for VANETS (pp. 299–304). Presented at the ITS Telecommunications, 2008. ITST 2008. 8th International Conference on. doi:10.1109/ITST.2008.4740275.

Rappaport, T. S. (2002). *Wireless Communications: Principles and Practice (2nd Edition)*. Prentice Hall. Retrieved from <http://www.worldcat.org/isbn/0130422320>

Rawashdeh, Z., & Mahmud, S. (2012). A novel algorithm to form stable clusters in vehicular ad hoc networks on highways. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012(1), 15. doi:10.1186/1687-1499-2012-15.

Rezende, C., Boukerche, A., Pazzi, R. W., Rocha, B. P. S., & Loureiro, A. A. F. (2011). The impact of mobility on Mobile Ad Hoc Networks through the perspective of complex networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 71(9), 1189–1200. doi:10.1016/j.jpdc.2010.12.009.

Sahoo, J., Wu, E. H. K., Sahu, P. K., & Gerla, M. (2009). BPAB: Binary Partition Assisted Emergency Broadcast Protocol For Vehicular Ad Hoc Networks (pp. 1–6). IEEE. doi:10.1109/ICCCN.2009.5235233.

Sahu, P., Wu, E., Sahoo, J., & Gerla, M. (2010). DDOR: Destination discovery oriented routing in highway/freeway VANET+. *Telecommunication Systems*, 1–18.

Santos, R. A., Alvarez, O., & Edwards, A. (2005). Performance evaluation of two location-based routing protocols in vehicular Ad-Hoc networks. Presented at the IEEE 62nd Vehicular Technology Conference (VTC). doi:10.1109/VETEFC.2005.1558956.

Schmidt, R., Leinmuller, T., Schoch, E., Kargl, F., & Schafer, G. (2010). Exploration of adaptive beaconing for efficient intervehicle safety communication. *IEEE Network*, 24(1), 14–19. doi:10.1109/MNET.2010.5395778.

Schwartz, R. S., R. Barbosa, R. R., Meratnia, N., Heijenk, G., & Scholten, H. (2011). A directional data dissemination protocol for vehicular environments. *Computer Communications*, 34(17), 2057–2071. doi:10.1016/j.comcom.2011.03.007.

Shafiee, K., & Leung, V. C. M. (2011). Connectivity-aware minimum-delay geographic routing with vehicle tracking in VANETs. *Ad Hoc Networks*, 9(2), 131–141. doi:10.1016/j.adhoc.2010.06.003.

Shuhaimi, N. I., & Juhana, T. (2012). Security in vehicular ad-hoc network with Identity-Based Cryptography approach: A survey (pp. 276–279). IEEE. doi:10.1109/TSSA.2012.6366067.

Sichitiu, M., & Kihl, M. (2008). Inter-vehicle communication systems: a survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 10(2), 88–105. doi:http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2008.4564481.

Statistics, N. T. (2010). Washington, DC: U.S. Dept. Transportation, U.S. Govt. Printing Office.

Sugiura, A., & Dermawan, C. (2005). In traffic jam IVC-RVC system for ITS using Bluetooth. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 6(3), 302 – 313. doi:http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2005.853704.

Sven Jaap, Marc Bechler, & Lars Wolf. (2005). Evaluation of Routing Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks in City Traffic Scenarios. Presented at the Proc. 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems Telecommunications (ITST).

Taysi, Z. C., & Yavuz, A. G. (2012). Routing Protocols for GeoNet: A Survey. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 13(2), 939–954. doi:10.1109/TITS.2012.2183637.

Tonguz, O. K., & Boban, M. (2010). Multiplayer games over Vehicular Ad Hoc Networks: A new application. *Ad Hoc Netw.*, 8(5), 531–543. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2009.12.009.

Tonguz, O., Wisitpongphan, N., & Bai, F. (2010). DV-CAST: A distributed vehicular broadcast protocol for vehicular ad hoc networks. *IEEE Wireless Communications*, 17(2), 47–57. doi:10.1109/MWC.2010.5450660.

Treiber, M., Hennecke, A., & Helbing, D. (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Phys. Rev. E*, 62, 1805–1824. doi:10.1103/PhysRevE.62.1805.

Treiber, Martin, Hennecke, A., & Helbing, D. (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review E*, 62(2), 1805–1824. doi:10.1103/PhysRevE.62.1805.

VanetMobiSim Project Home Page. (n.d.). <http://vanet.eurecom.fr>.

Vinayakray-Jani, P., & Sanyal, S. (2012). Routing Protocols for Mobile and Vehicular Ad-Hoc Networks: A Comparative Analysis. *CoRR*, *abs/1206.1918*.

Vinel, A. (2012). 3GPP LTE Versus IEEE 802.11p/WAVE: Which Technology is Able to Support Cooperative Vehicular Safety Applications? *Wireless Communications Letters, IEEE*, *1*(2), 125–128. doi:<http://dx.doi.org/10.1109/WCL.2012.022012.120073>.

Wang, H., Ni, D., Chen, Q.-Y., & Li, J. (2011). Stochastic modeling of the equilibrium speed-density relationship. *Journal of Advanced Transportation*. doi:10.1002/atr.172.

Wisitpongphan, N., Tonguz, O.K., Parikh, J.S., Mudalige, P., Bai, F., & Sadekar, V. (2007). Broadcast storm mitigation techniques in vehicular ad hoc networks. *IEEE Wireless Communications*, *14*(16), 84–94.

Wu, C., Kumekawa, K., & Kato, T. (2010). A Novel Multi-hop Broadcast Protocol for Vehicular Safety Applications. *Journal of Information Processing*, *18*, 110–124. doi:10.2197/ipsjip.18.110.

Wu, C., Ohzahata, S., & Kato, T. (2012). VANET Broadcast Protocol Based on Fuzzy Logic and Lightweight Retransmission Mechanism. *IEICE Transactions on Communications*, *E95-B*(2), 415–425. doi:10.1587/transcom.E95.B.415.

Yamakawa, T. (2011). Electronic circuits dedicated to fuzzy logic controller. *Scientia Iranica*, *18*(3), 528–538. doi:10.1016/j.scient.2011.04.002.

Yan, Z., Jiang, H., Shen, Z., Chang, Y., & Huang, L. (2012). k-Connectivity Analysis of One-Dimensional Linear VANETs. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, *61*(1), 426–433. doi:10.1109/TVT.2011.2176969.

Zhang, S., Lu, J., & Zhang, C. (2004). A fuzzy logic based method to acquire user threshold of minimum-support for mining association rules. *Information Sciences*, *164*(1-4), 1–16. doi:10.1016/j.ins.2003.09.017.