



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

TESIS DOCTORAL

**Optimización de mecanismos para la difusión de información en
redes vehiculares**

Autor:

M. en C. Salvador Gonzalez Arellano

*Trabajo presentado en cumplimiento de
los requisitos para la obtención de grado de
Doctor en Ciencias y Tecnologías de la Información*

Asesor:

Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos

Sustentada el 22 de noviembre del 2017 ante el jurado:

Presidente: Dr. Enrique Stevens Navarro, Facultad de Ciencias,
UASLP

Secretario: Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos, Departamento de
Ingeniería Eléctrica, UAM-I

Vocal: Dr. Ulises Pineda Rico, Facultad de Ciencias, UASLP

Vocal: Dra. Graciela Román Alonso, Departamento de Ingeniería
Eléctrica, UAM-I

Vocal: Dr. Miguel López Guerrero, Departamento de Ingeniería
Eléctrica, UAM-I

Resumen

Se espera que las redes vehiculares ad hoc logren ofrecer una amplia variedad de servicios como la información del tráfico, prevención contra accidentes, entretenimiento, por mencionar algunos. Muchas de las aplicaciones previstas para las redes vehiculares requieren que los vehículos informen su posición y la cinemática. Los mensajes de emergencia que se difunden en las redes vehiculares ofrecen la posibilidad a diferentes aplicaciones de brindar información para la seguridad de los conductores. Dicha difusión debe hacerse lo más rápido posible, aunque cada aplicación tiene sus propios requerimientos. Para mejorar el envío de mensajes, se han propuesto diversos algoritmos para realizar esta tarea. Con el fin de tener una vista general de cómo las diferentes técnicas difunden un mensaje, seleccionamos un conjunto de algoritmos que hacen uso de una o más técnicas comúnmente usadas en la literatura. En este trabajo, realizamos un profundo análisis de los mecanismos de difusión de información crítica. Con el fin de alcanzar un bajo retardo y una alta confiabilidad para difundir mensajes de seguridad, proponemos un algoritmo que preestablece el tiempo de espera para retransmitir los mensajes. Mostramos que, haciendo esto, podemos reducir significativamente el retardo para cubrir un área de interés. También hacemos énfasis en la importancia de considerar la zona en la que se realizan las simulaciones de las redes vehiculares con el fin de presentar resultados más precisos.

Agradecimientos

Agradezco de manera especial y sincera al Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos por aceptarme para realizar este proyecto de investigación. Su apoyo y confianza en mi trabajo y su capacidad para guiar mis ideas ha sido un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de este proyecto, sino también en mi formación como investigador.

También agradezco a los profesores y compañeros que me han acompañado durante este proceso, brindándome siempre su orientación con profesionalismo ético en la adquisición de conocimientos y afianzando mi formación como estudiante e investigador. Extiendo el agradecimiento a nuestra casa de estudios por haberme dado la oportunidad de ingresar al posgrado. Igualmente agradezco al CONACYT por brindarme la beca que me permitió cumplir este gran sueño.

Finalmente doy gracias a mi familia, por apoyarme cuando lo necesité, alentarme, y por siempre estar ahí ante cualquier situación.

Contenido

Resumen	I
Agradecimientos	II
Lista de figuras	VII
Lista de tablas	IX
Acrónimos	XI
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	4
1.2. Metodología	5
1.3. Lista de aportaciones	6
1.4. Estructura de la tesis	7
2. Antecedentes y trabajo relacionado	9
2.1. Canales de propagación	10
2.1.1. Propiedades de los canales	13
2.1.2. Medios de propagación	14
2.1.3. Antenas vehiculares	15
2.1.4. Canales Vehículo a Infraestructura (V2I)	17
2.1.5. Canales Vehículo a Vehículo (V2V)	18
2.1.6. Modelos de canales vehiculares	20
2.1.7. Estándar IEEE 802.11p	22
2.2. Difusión de información en sistemas WAVE (Broadcast)	25

2.2.1.	Algoritmos de difusión de información para los sistemas WAVE	27
2.2.1.1.	Bounding algorithm	32
2.2.1.2.	GEDDAI	33
2.2.1.3.	OppCast	34
2.2.1.4.	Non GPS Data Dissemination (NoG+DTA)	36
2.2.1.5.	OB-VAN	38
3.	Modelos de movilidad	41
3.1.	Modelos sintéticos	42
3.2.	Modelos basados en observaciones	43
3.3.	Modelos basados en trazas	43
3.4.	Modelo IDM	44
4.	Herramientas de simulación	47
5.	<i>Fast-OB-VAN</i>	51
5.1.	Descripción del algoritmo <i>Fast-OB-VAN</i>	51
5.2.	Medidas de desempeño	55
5.3.	Resultados	55
5.3.1.	Retardo promedio	56
5.3.2.	Número de retransmisiones	57
5.3.3.	Porcentaje de veces que el algoritmo termina correctamente	57
5.3.4.	Porcentaje de vehículos que reciben el mensaje correctamente	58
6.	<i>Preset Delay Broadcast</i>	61
6.1.	Descripción del algoritmo <i>Preset Delay Broadcast</i>	62
6.2.	Escenarios de estudio	67
6.2.1.	Eficiencia de los algoritmos	67
6.2.2.	Interrupción de los <i>beacons</i>	67
6.2.3.	Acceso continuo al canal	68
6.3.	Resultados	69
6.3.1.	Retardo promedio	69
6.3.2.	Retransmisión de mensajes	72
6.3.3.	Porcentaje de veces que el algoritmo termina correctamente	73

6.3.4. Porcentaje de vehículos que reciben el mensaje	76
7. Efecto del entorno vehicular en la difusión de información en VANET	77
7.1. Escenario propuesto	79
7.2. Parámetros del sistema	80
7.3. Resultados	81
7.3.1. Retardo promedio	82
7.3.2. Retransmisión de mensajes	83
7.3.3. Porcentaje de veces que el algoritmo terminó correctamente	85
7.3.4. Porcentaje de vehículos que reciben el mensaje	85
8. Conclusiones y perspectivas	89

Lista de figuras

1.1. Ejemplo de un sistema WAVE.	2
2.1. Capas de los sistemas WAVE.	10
2.2. Distribución de canales para los sistemas WAVE.	11
2.3. Tipos de acceso al medio: (a) acceso continuo, (b) acceso alternado, (c) acceso inmediato, y (d) acceso extendido.	12
2.4. Posición de la antena montada en un vehículo.	15
2.5. Problema <i>broadcast storm</i>	29
2.6. Representación gráfica del algoritmo <i>Bounding</i>	33
2.7. Zonas <i>Sweet Spot</i> propuestas por los autores de <i>GEDDAI</i>	35
2.8. Zonas creadas por el algoritmo <i>OppCast</i>	36
2.9. Ejemplo de un conjunto conectado dominante (CDS)	37
2.10. Ejemplo de una condición de topología.	38
2.11. Ejemplo de una contienda en <i>OB-VAN</i>	39
4.1. Escenario de movilidad.	48
4.2. Diagrama de ejecución.	50
5.1. Ejemplo de los intervalos creados por <i>OB-VAN</i>	53
5.2. Retardo promedio como función del número de nodos.	56
5.3. Porcentaje de vehículos que retransmiten el mensaje.	58
5.4. Porcentaje de veces que el algoritmo termina correctamente.	59
5.5. Porcentaje de vehículos que reciben el mensaje correctamente.	59
6.1. Diagrama de flujo de la recepción de mensajes en <i>PDB</i>	64
6.2. Ejemplo de los datos agregados al mensaje de seguridad.	65
6.3. Ejemplo de los posibles mensajes para el escenario 1.	67
6.4. Ejemplo de los posibles mensajes para el escenario 2.	68
6.5. Ejemplo de los posibles mensajes para el escenario 3.	69

6.6. Izquierda: Retardo promedio como función del número de nodos en los escenarios uno (a), dos (b), y tres (c). Derecha: Porcentaje de vehículos que retransmiten el mensaje en los escenarios uno (d), dos (e), y tres (f).	70
6.7. Izquierda: Porcentaje de veces que el algoritmo terminó correctamente en los escenarios uno (a), dos (b), y tres (c). Derecha: Porcentaje de vehículos que recibieron el mensaje correctamente en los escenarios uno (d), dos (e), y tres (f). .	74
7.1. Escenario propuesto.	80
7.2. Retardo promedio para las fuentes (a) <i>S0</i> , (b) <i>S1</i> y (c) <i>S2</i> . . .	83
7.3. Porcentaje de retransmisiones para las fuentes (a) <i>S0</i> , (b) <i>S1</i> y (c) <i>S2</i>	84
7.4. Porcentaje de veces que los algoritmos terminan correctamente para las fuentes (a) <i>S0</i> , (b) <i>S1</i> y (c) <i>S2</i>	86
7.5. Porcentaje de vehículos que reciben el mensaje exitosamente para las fuentes (a) <i>S0</i> , (b) <i>S1</i> y (c) <i>S2</i>	87

Lista de tablas

2.1. Aplicaciones cooperativas de seguridad vial.	28
4.1. Configuración de la red.	48
4.2. Configuración de los vehículos.	49
7.1. Configuración de los vehículos.	81

Acrónimos

AP	A ccess P oint
BS	B ase S tation
BSS	B asic S ervice S et
CCH	C ontrol C hannel
EDCA	E nhanced D istributed C hannel A ccess
IDM	I ntelligent D river M odel
LLC	L ogical L ink C ontrol
MAC	M edium A ccess C ontrol
MLME	M AC L ayer M anagement E ntity
OBU	O n B oard U nit
OFDM	O rthogonal F requency D ivision M ultiplexing
PDB	P reset D elay B roadcast
PLME	P HY L ayer M anagement E ntity
RSU	R oad S ide U nit
SCH	S ervice C hannel
SIFS	S hort I nter F rame S pace
TCP	T ransmission C ontrol P rotocol
UDP	U ser D atagram P rotocol

UTC	U niversal T ime C oordinated
V2I	Comunicación V ehículo a I nfraestructura
V2V	Comunicación V ehículo a V ehículo
VANET	V ehicular A d hoc N etwork
WAVE	W ireless A ccess in V ehicular E nvironments
WME	W AVE M anagement E ntity
WSA	W AVE S ervice A dvertisement
WSMP	W AVE S hort M essage P rotocol

Capítulo 1

Introducción

La investigación en las comunicaciones vehiculares ha comenzado a tener un crecimiento acelerado desde 1999. Se espera que las redes vehiculares ad hoc (*VANET* por sus siglas en inglés) logren ofrecer una amplia variedad de servicios como la información del tráfico, prevención contra accidentes, entretenimiento, asistencia para cambiar de carril, asistencia para incorporarse a una avenida, por mencionar algunos. Durante el 2006, la iniciativa *Wireless Access for Vehicular Environments* (*WAVE*) brindó un crecimiento de dicha investigación aún más fuerte para las *VANETs*. Para poder ofrecer dichos servicios, es necesario contar con una infraestructura confiable así como con protocolos que puedan ofrecer una buena calidad de los servicios, por lo que los sistemas *WAVE* ofrecen un conjunto de estándares para cubrir estas necesidades.

En la infraestructura propuesta para los sistemas *WAVE*, existen dos posibles formas de comunicación. Por un lado, tenemos intercambio de mensajes

entre un vehículo (*OnBoard Unit, OBU*) y un dispositivo ubicado en la orilla del camino (*RoadSide Unit, RSU*), comúnmente llamada *Vehicle to Infrastructure (V2I)* por sus siglas e inglés). Y por otro lado, entre dos o más vehículos, llamada *Vehicle to Vehicle (V2V)* por sus siglas en inglés). Con estas dos formas de comunicación, se puede tener información confiable durante todo el camino. Cualquier vehículo puede aportar información sobre el estado vial, así como cualquier otro aviso que desee compartir. Además, las *RSU* pueden comunicarse con redes fijas para tener salida hacia Internet como se puede apreciar en la Figura 1.1.

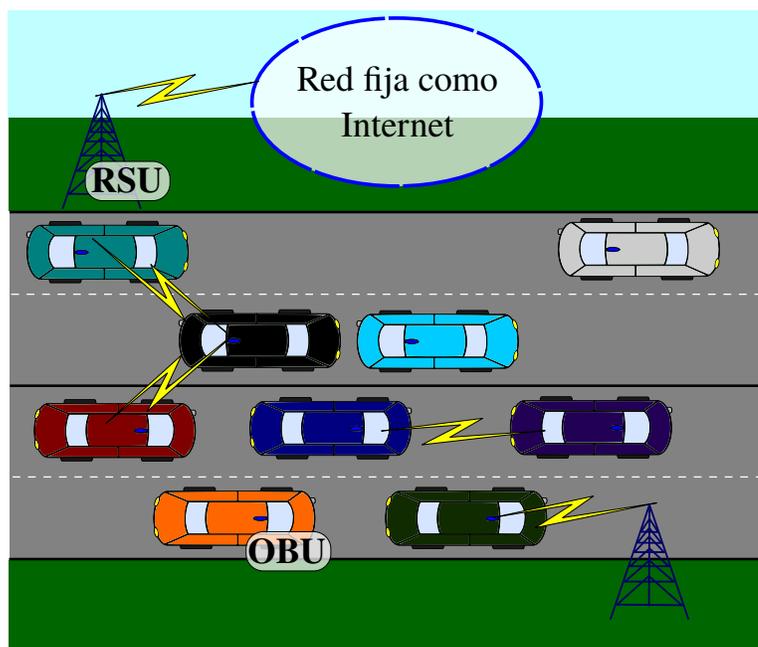


FIGURA 1.1: Ejemplo de un sistema WAVE.

Para que las infraestructuras de las *VANET* puedan comunicarse correctamente, el comité de sistemas de transporte inteligente de la sociedad de tecnología vehicular de la IEEE propuso el estándar para las redes vehiculares IEEE 802.11p [1], el cual tiene como propósito habilitar mecanismos

eficaces que controlen el funcionamiento de las capas superiores a través de múltiples canales, sin necesidad de conocer los parámetros de la capa física, y describir la operación multicanal de encaminamiento y conmutación para diferentes escenarios. Dicho estándar es requerido por los sistemas de transporte inteligente, IEEE 802.11p cubre la capa física y parte de la capa de enlace de la pila de protocolos para los sistemas *WAVE* [2].

Un aspecto muy importante en las *VANET* es la difusión de información de seguridad vial. Para esto, es de gran utilidad la cooperación entre los vehículos para compartir información y lograr su principal objetivo, el cual es la seguridad de los conductores. Es tan importante este proceso de difusión que empresas como *Ford*, *General Motors*, *Honda*, *Mercedes-Benz* y *Toyota* han colaborado para detectar y proponer aplicaciones que ofrezcan seguridad a los conductores [3]. Para que la información de seguridad que comparten los vehículos sea útil, es necesario que ésta llegue dentro de cierto tiempo, el cual puede estar definido por cada aplicación. Además, debe llegar a todos los vehículos que se encuentren dentro de un área de interés, para que todos ellos puedan reaccionar al evento del cual estén siendo informados. Por lo tanto, se requiere que la información de seguridad sea rápida y confiable.

Dada la importancia que tiene el proceso de difusión de información de seguridad, en este trabajo se analizan detalladamente distintas técnicas de difusión de información en *VANETs*. En la literatura encontramos diferentes algoritmos de difusión de información, muchos de estos algoritmos están pensados para escenarios específicos. Deseamos encontrar, mediante una extensa campaña de simulaciones, qué técnica ofrece una difusión de información más rápida y confiable. Esta evaluación es de suma importancia, ya que no encontramos en la literatura un amplio análisis de las ventajas

y desventajas de las diferentes técnicas. Cabe destacar que dicha campaña de simulaciones se lleva a cabo bajo las mismas condiciones, todos los algoritmos son evaluados sobre el estándar IEEE 802.11p. Una vez que hemos encontrado las ventajas y desventajas de las diferentes técnicas de difusión, proponemos un algoritmo de difusión de información de seguridad al que llamamos *Preset Delay Broadcast (PDB)*. El objetivo de *PDB* es brindar una difusión rápida y confiable, al mismo tiempo tratando de hacer la menor cantidad de retransmisiones para no congestionar la red. Finalmente, realizamos una evaluación de diferentes escenarios vehiculares, es decir, en una autopista conectada a una área urbana. La motivación de hacer esto es ofrecer una comparación del comportamiento de los algoritmos bajo distintas condiciones como la velocidad de los vehículos o la densidad de los mismos.

1.1. Objetivos

Una vez que hemos enmarcado el contexto de esta tesis de doctorado, y hemos resaltado la importancia de la difusión de información de seguridad, a continuación se describen de manera puntual el objetivo general y los objetivos particulares que se perseguirán durante el trabajo de investigación propuesto.

Objetivo general: Proponer mecanismos eficientes de difusión de información crítica para aplicaciones de redes vehiculares.

Objetivos específicos:

1. Analizar el impacto de los mecanismos propuestos para redes vehiculares.
2. Estudiar la utilidad de los métodos de difusión oportunistas.
3. Estudiar el comportamiento de los mecanismos de difusión de información en diferentes escenarios de movilidad vehicular.
4. Proponer un algoritmo de difusión de información para redes vehiculares que sea altamente confiable.

1.2. Metodología

Las *VANET* se pueden abordar mediante la simulación numérica, implementar dispositivos reales para equipar vehículos y realizar pruebas, o simulación por medio de simuladores de eventos discretos. La simulación numérica requiere de modelos matemáticos precisos, además de requerir modelos para cada parte que se va a simular, desde cómo se difunde la señal en el medio hasta cómo se generan y manejan los mensajes. El uso de dispositivos reales tiene un alto costo monetario sobre todo por los vehículos que se van a utilizar. Los simuladores de eventos discretos nos dan la facilidad de implementar una gran cantidad de vehículos, además los simuladores cuentan con un gran soporte por parte de la comunidad por lo que son muy confiables. Es por esto que decidimos llevar a cabo nuestra investigación utilizando simuladores de eventos discretos.

Con el fin de alcanzar los objetivos propuestos proponemos la siguiente metodología:

1. Realizar una revisión bibliográfica sobre la difusión de información en las *VANET*.
2. Realizar una evaluación, mediante simulación, de las diferentes técnicas para difundir información en las *VANET*.
3. Identificar las técnicas de difusión de información que ofrecen mayores beneficios para el desempeño de dicha difusión.
4. Realizar una propuesta aprovechando el conocimiento previo para ofrecer una difusión de información que sea confiable, que presente un bajo retardo y que realice pocas retransmisiones.
5. Identificar como afecta el entorno vehicular al desempeño de la difusión de información en *VANET*.

1.3. Lista de aportaciones

De este trabajo se produjeron los siguientes artículos:

Artículo presentado en *9th International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies* titulado “*Fast-OB-VAN: A Fast Opportunistic Broadcast Protocol for VANETs*” [4]. Aquí presentamos una mejora al algoritmo *OB-VAN* la cual mejora en gran medida el desempeño de éste.

Artículo publicado en *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* titulado “*Preset delay broadcast: a protocol for fast information dissemination in vehicular ad hoc networks (VANETs)*” [5]. En este artículo presentamos un nuevo algoritmo, el cual comparamos con otros algoritmos que representan las diferentes técnicas utilizadas para difundir información en *VANET*.

Finalmente, en este trabajo realizamos una evaluación del desempeño de los mejores algoritmos encontrados en diferentes entornos vehiculares con el fin de determinar cómo afectan dichos entornos al desempeño de los algoritmos.

1.4. Estructura de la tesis

La tesis se desarrolla de la siguiente manera. En el Capítulo 2 se presentan los antecedentes de las redes vehiculares, así como el trabajo relacionado a nuestra propuesta. Posteriormente en el Capítulo 3 damos un panorama sobre los modelos para la movilidad vehicular. En el Capítulo 4 abordamos las herramientas de simulación de red para las *VANET*, y presentamos cuál fue nuestra elección y porqué. Una primera propuesta para mejorar el desempeño de la difusión de información en *VANET* se da en el Capítulo 5. Posteriormente en el Capítulo 6 desarrollamos una propuesta nueva para difundir información en *VANET* llamada *Preset Delay Broadcast*. En el Capítulo 7 exploramos el comportamiento de los algoritmos de difusión en diferentes áreas en las que los vehículos pueden encontrarse. Finalmente en el Capítulo 8 damos las conclusiones y perspectivas obtenidas a lo largo de este trabajo.

Capítulo 2

Antecedentes y trabajo relacionado

Los sistemas *WAVE* ofrecen una arquitectura para proveer servicios de seguridad, así como aquellos que no tienen que ver con ésta. En la Figura 2.1 se muestra una vista general de la arquitectura de los sistemas *WAVE*. Como podemos ver, y ya habíamos mencionado anteriormente, la comunicación se lleva a cabo por medio del estándar IEEE 802.11p [1], el cual tiene como propósito proveer servicios eficaces para la capa física y parte de la capa de enlace. La operación multicanal está a cargo del estándar IEEE 1609.4 [6], y en las capas superiores el resto de los estándares de la familia IEEE 1609.X. Cabe mencionar que también tenemos propuestas de estándares por parte de la *Association of Radio Industries and Businesses (ARIB STD-T109)* [7] para Japón, del *European Telecommunications Standards Institute (ETSI, TC ITS)* [8] y la *International Organization for Standardization (ISO/TC 204/WG 18)* [9] para Europa y otras partes del mundo.

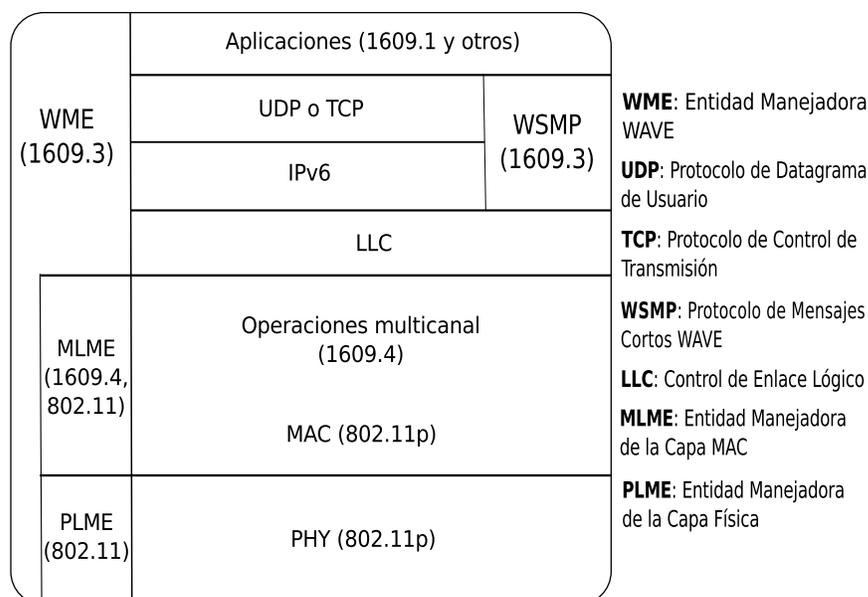


FIGURA 2.1: Capas de los sistemas WAVE.

En este capítulo, presentamos los antecedentes de las redes vehiculares con el fin de brindar una amplia panorámica de este tipo de redes. Presentamos de manera general la estructura de los sistemas WAVE, así como el trabajo relacionado a nuestro tema de interés.

2.1. Canales de propagación

Los sistemas WAVE operan en la banda de los 5.9 GHz y trabajan con un total de siete canales para realizar la comunicación, cada uno de estos canales con un ancho de banda de 10 MHz. Sin embargo, dos canales pueden ser usados juntos para utilizar un canal con un ancho de banda de 20 MHz tal como se muestra en la Figura 2.2. El canal central, es el canal de control

(*CCH*), mediante el cual se difunden mensajes de seguridad, así como mensajes de coordinación para el resto de los canales. Los seis canales restantes están designados para la comunicación de servicios de baja prioridad y se les denomina canal de servicio (*SCH*).

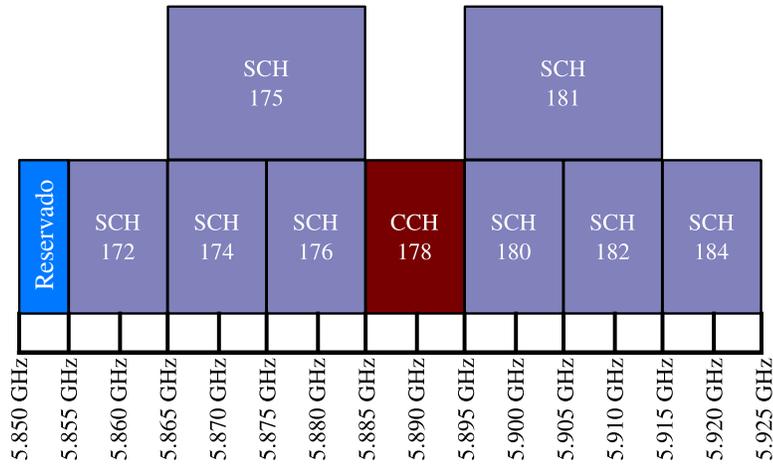


FIGURA 2.2: Distribución de canales para los sistemas *WAVE*.

Muchas de las aplicaciones previstas para las *VANETs* requieren que los vehículos informen, mediante el canal de control, la información de su posición y la cinemática. Para estos casos, la difusión de información periódica en mensajes cortos, llamados *beacons*, es fundamental para que los conductores sean conscientes sobre el estado de la carretera a su alrededor. Los *beacons* se generan con una frecuencia de entre 5 y 10 Hz [10], lo cual podría causar congestión en el canal de control, y por lo tanto provocar que éstos se pierdan. Esto puede afectar en gran medida el desempeño de las aplicaciones en las *VANETs*. Además, los canales tienen diferentes formas de acceder al medio, como podemos ver en la Figura 2.3 podemos tener un acceso continuo, ya sea el *CCH* o algún *SCH* operaría de manera continua. También

podemos tener acceso alternado, el cual es el tipo de acceso predeterminado para los sistemas *WAVE*, en este tipo de acceso se cambia del *CCH* a alguno de los *SCH* cada 50 ms. Otro tipo de acceso es el inmediato, aquí cuando algún canal solicita el acceso, entonces se le da el turno de manera inmediata, aun si no han terminado los 50 ms del otro canal. Finalmente tenemos el acceso extendido, en el cual ya sea el *CCH* o algún *SCH* pueden operar por más tiempo del predefinido.

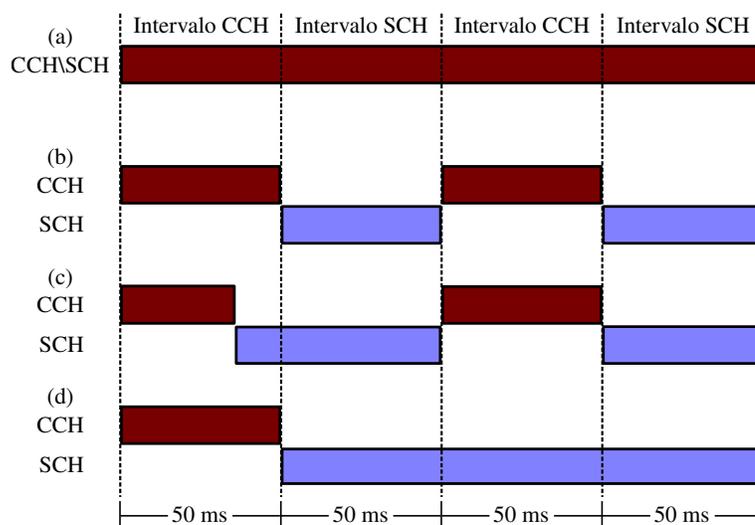


FIGURA 2.3: Tipos de acceso al medio: (a) acceso continuo, (b) acceso alternado, (c) acceso inmediato, y (d) acceso extendido.

Para las aplicaciones que pueden ser tolerantes al retardo o fallas, como la descarga de mapas, navegación web, descarga de archivos, etc., se puede inicializar un conjunto de servicios básicos (*Basic Service Set, BSS*). Mediante peticiones de servicios sobre el canal de control (denominados *WAVE Service Advertisement, WSA*), se realizan las solicitudes para iniciar los *BSS* y cambiar a uno de los seis canales destinados para dichos servicios.

2.1.1. Propiedades de los canales

En una comunicación inalámbrica, la señal se propaga desde un transmisor Tx hacia un receptor Rx por varias rutas. La potencia de la señal está sometida a los efectos ambientales, al desvanecimiento, al efecto *Doppler*, la difracción, la refracción, entre otras. En los canales de las *VANETs* se suele hacer distinción entre los canales para las comunicaciones $V2I$ y las $V2V$. Para los escenarios de comunicación $V2V$ no existen las estaciones base (*Base Station, BS*) ni los puntos de acceso (*Access Point, AP*) ya sea en Tx o en Rx , los cuales se mueven a altas velocidades. Las antenas receptoras y transmisoras están ubicadas a una altura de entre 1 y 2 metros por lo que se tienen diversos factores que influyen en la dispersión de la señal dependiendo de la cantidad de vehículos presentes en la vía, así como el ambiente en el que se encuentren los vehículos (campo, área urbana, ciudad, etc.), por mencionar algunos. Para los escenarios de comunicación $V2I$ el canal de propagación es similar al de una microred celular, si las antenas de las *BS* o los *AP* están elevadas. Si las antenas están a baja altura, el canal de propagación se comporta de manera similar al escenario $V2V$, con la importante diferencia de que las velocidades de dispersión varían considerablemente.

Todos los factores mencionados anteriormente influyen en la manera en que se propaga la señal desde los transmisores hasta los receptores. Debido a esta variación en la forma en que se propaga la señal, es altamente deseable que un sistema inalámbrico trabaje de manera óptima en uno de los escenarios, pero que también funcione de igual manera en un escenario completamente distinto.

2.1.2. Medios de propagación

Como ya hemos mencionado, las características del medio de propagación dependen del ambiente en el que se localice la comunicación, y es por esta razón que se han estudiado las comunicaciones $V2V$ y $V2I$ en diferentes ambientes [11]. Dichos estudios han conducido a las siguientes características para los ambientes más comunes:

- **Áreas urbanas:** en estas áreas suelen haber uno o dos carriles en cada dirección, en estas zonas las casas están cerca de la acera y generalmente el tráfico es denso, pero depende de la región pues, por ejemplo, en Estados Unidos las calles son amplias y rectas, mientras que en Europa son más estrechas y zigzagueantes.
- **Áreas suburbanas:** en estas áreas, de igual manera que en las áreas urbanas, suelen haber uno o dos carriles en cada dirección, pero las calles son más estrechas y las casas están más alejadas de la acera, de la misma forma esto depende de la región, las áreas suburbanas suelen tener un tráfico ligero.
- **Autopistas:** suelen tener de dos a seis carriles en cada dirección y comúnmente no hay casas en las cercanías. A menudo hay una división que separa los carriles de ambos sentidos, además muchas de las carreteras se construyen con estructuras para reducir el ruido (como paredes aislantes de sonido), en las autopistas puede variar la densidad del tráfico dependiendo de donde esté localizada la autopista, en zona urbana o en zona rural.

- **Caminos rurales:** en estos caminos suele haber un solo carril en cada dirección, normalmente no cuentan con edificios o casas, pero sí tienen a los alrededores vegetación y colinas que influyen en la multitrayectoria de la señal.

2.1.3. Antenas vehiculares

Ya hemos visto los fenómenos que afectan la propagación de la señal, pero la posición y lugar en que se monta la antena en el vehículo también tiene un rol importante en el desempeño de las comunicaciones vehiculares, especialmente en las comunicaciones *V2V*. Las comunicaciones vehiculares predominan en el plano (x, y) y ya que los vehículos tienen, principalmente, un movimiento relativo y dirección en el plano horizontal, se desea que las antenas tengan un patrón de radiación omnidireccional para todos los ángulos de azimuth ϕ y con una elevación máxima $\theta = 90^\circ$, una apreciación gráfica se observa en la Figura 2.4 [10].

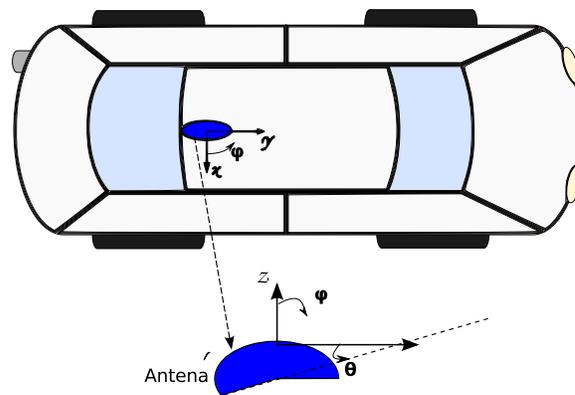


FIGURA 2.4: Posición de la antena montada en un vehículo.

Por otro lado, la comunicación $V2I$ es menos restrictiva en cuanto a la posición de la antena, ya que la calidad del enlace, así como las estadísticas de desvanecimiento asociados, generalmente presentan mejores condiciones en comparación con la comunicación $V2V$. Debido a que la diferencia en el ángulo de elevación entre las comunicaciones $V2V$ y $V2I$ es relativamente pequeña, es altamente deseable, desde la perspectiva del diseño y el costo, que ambas comunicaciones compartan una misma antena.

Las antenas tienen diferentes aspectos que afectan el desempeño de las mismas:

- La inclinación del ángulo de elevación θ debido a las características del toldo del vehículo.
- Desvanecimiento del patrón de radiación debido a la inclinación θ_{roof} .
- El acoplamiento de los elementos de la antena que se encuentran dentro del módulo.
- El acoplamiento con el material dieléctrico del módulo de la antena.

La técnica de antenas múltiples ha captado la atención de los investigadores debido a que pueden aplicarse al estándar mediante técnicas *Beamforming* [12]. Además, las técnicas de antenas múltiples permiten una mayor fiabilidad, escalabilidad, robustez en el sistema y minimización de las interferencias en redes vehiculares con mucha carga como por ejemplo, una autopista muy congestionada. Desafortunadamente, el espacio para colocar múltiples antenas es realmente limitado, esto debido a las consideraciones de la industria automotriz sobre la parte estética y el costo de los materiales necesarios.

2.1.4. Canales Vehículo a Infraestructura (V2I)

Para los canales de comunicación *V2I* se pueden considerar los siguientes dos tipos de infraestructura: 1) la infraestructura celular (por ejemplo, los estándares *3G* o *WiMax*), la cual puede ser utilizada en las redes vehiculares para la transferencia de voz y datos; 2) infraestructura dedicada para los sistemas de transporte inteligente que sigan el estándar IEEE 802.11p. Cualquiera que sea el caso, la comunicación se lleva a cabo entre un dispositivo instalado en el vehículo y un *AP* elevado. Tomando esto en cuenta, podemos hacer una distinción de los escenarios de la siguiente manera:

- **Cobertura macrocelular** para las zonas rurales, suburbanas y partes de las zonas urbanas las cuales no son consideradas como prioritarias durante el lanzamiento inicial de la infraestructura dedicada *WAVE*.
- **Cobertura microcelular** para las zonas urbanas y metropolitanas, ya sea por estaciones base convencionales, o con infraestructura dedicada *WAVE*, la implementación y las características de propagación, de estos dos casos es muy similar. Las estaciones base o puntos de acceso se colocan por lo general a la altura de los postes de luz, sobre todo en las intersecciones, de tal forma que ambas calles estén cubiertas, pero en cualquier caso, se encontrarán a menor altura que los techos de los edificios circundantes.
- **Cobertura para los túneles**, puede ser utilizada la infraestructura celular o infraestructura dedicada *WAVE*, las cuales se colocan en la parte superior de los túneles. Cubrir los túneles es de gran interés

para los sistemas de transporte inteligentes ya que pueden prevenir embotellamientos y accidentes.

- **Cobertura en las autopistas**, donde los puntos de acceso se colocan a la altura de los vehículos ya sea reemplazando o aumentando las casetas telefónicas de emergencia. Desde el punto de vista de la propagación, este escenario es similar a una comunicación *V2V*. Para algunos tipos de autopistas se puede colocar infraestructura dedicada *WAVE*, ubicada en los puentes peatonales, mientras que para carreteras con baja densidad de tráfico probablemente sea cubierto por la infraestructura convencional macrocelular.

Para los escenarios mencionados anteriormente, existen propuestas que modelan los canales de comunicación como por ejemplo; *COST 259 Directional Channel Model* [13], el *COST 273 Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO) Model* [14] y sus extensiones, el modelo de canal espacial *3GPP* [15] y el *WINNER Channel Model* [16] recientemente adoptado por la *International Telecommunications Union*.

2.1.5. Canales Vehículo a Vehículo (V2V)

En contraste con los canales *V2I*, los canales *V2V* difieren significativamente de los canales celulares, especialmente en términos de selectividad de frecuencia y tiempo, así como sus estadísticas de desvanecimiento asociadas. La investigación sobre canales *V2V* es un tema relativamente joven y cobró impulso en 2006, cuando la iniciativa *WAVE* y otras aplicaciones vehiculares despertaron el interés en las comunicaciones vehiculares. Varias campañas

para la medición de los canales $V2V$ se han llevado a cabo desde el año 2006, por ejemplo el trabajo de J. Kunisch y J. Pamp [17] donde miden el efecto *Doppler* comparando las frecuencias de 5.9 GHz y 2.4 GHz, esto debido a que el modelo de canal para IEEE 802.11p se construyó escalando el efecto *Doppler* de 2.4 GHz a 5.9 GHz, los autores encontraron un efecto *Doppler* similar en ambas frecuencias. También tenemos como ejemplo el trabajo de A. Paier et al. [18], donde evalúan el canal en términos del efecto *Doppler* y el *Power-Delay Profile (PDP)* o perfil de potencia respecto al retardo. Encontraron que el canal se ve altamente afectado por la trayectoria múltiple de la señal debido a la difracción y refracción de la señal por objetos en la vía como señalamientos, puentes o camiones. Otro resultado importante es que la señal no se ve afectada por la obstrucción de la línea de vista.

Como hemos visto, tenemos diversos escenarios para estudiar el comportamiento de las redes vehiculares, además podemos dividir en dos el comportamiento de la red dependiendo de la dirección que lleven los vehículos, ya sea que Tx y Rx vayan en la misma dirección, en convoy, o vayan en direcciones opuestas. De la literatura [10], podemos resumir las características importantes de los canales $V2V$ de la siguiente manera:

- **En autopista:** se ha observado un exponente de *pathloss* de $n = [1.8, 1.9]$ en autopistas con poco tráfico. La media cuadrática en el retardo por dispersión en la autopista está en el rango 40 ns a 400 ns, donde los retardos más pequeños se refieren a una densidad de tráfico baja. En todos los entornos $V2V$, el efecto *Doppler* percibido tiende a ser más alto en comparación con los canales celulares, ya que la velocidad relativa entre Tx y Rx puede ser más alta. Se ha encontrado

que la media del efecto *Doppler* es aproximadamente 100 Hz, aunque se ha observado que puede llegar a ser hasta de 1 kHz.

- **Zona rural:** al igual que en el entorno de la autopista, se ha observado un exponente de *pathloss* de $n = [1.8, 1.9]$. Como un refinamiento, un modelo llamado *break point* ha sido propuesto [17], este modelo especifica dos exponentes de *pathloss*, para una distancia aproximada 200 metro se aplica un exponente de *pathloss* de $n = [1.8, 1.9]$, y más allá de dicha distancia se aplica un exponente de *pathloss* $n = 4$. La media cuadrática en el retardo por dispersión en las zonas rurales está en el rango 20 a 60 ns. El efecto doppler se encontró que era alrededor de 100 Hz, sin embargo puede llegar a ser hasta de 782 Hz.
- **Zona suburbana:** para estas zonas se encontró que el modelo *break point* se adecua de buena manera, con un exponente de *pathloss* $n = [2, 2.1]$ para distancias inferiores a 100 m y $n = 4$ para distancias más lejanas. La media cuadrática en el retardo por dispersión en las zonas suburbanas es de 104 ns.
- **Zona urbana:** en esta zona se observa un exponente de *pathloss* $n = [1.6, 1.7]$. La media cuadrática del retardo por dispersión en las zonas urbanas es de 40 ns a 300 ns. El efecto *Doppler* de 30 a 350 Hz, es más bajo en comparación con la autopista y la zona rural.

2.1.6. Modelos de canales vehiculares

Para evaluar el rendimiento de un sistema de comunicación vehicular mediante simulación y realizar un análisis de los nuevos algoritmos de procesamiento de señales, son necesarios los modelos para los canales, éstos permiten

evaluar el comportamiento de entrada-salida de los canales de propagación. Lo más importante a modelar son el *pathloss*, el retardo, el efecto *Doppler*, el desvanecimiento y la no estacionariedad del canal. Para los canales de las redes vehiculares, se distinguen tres tipos de modelos de canales que son:

- **Modelo *tap delay*:** en los modelos *tap delay*, la respuesta al impulso del canal se representa con componentes a ciertos retrasos (*taps*), por lo tanto, el canal es descrito por una línea de retardo llamada *tapping* (*Tapping Delay Line, TDL*). La potencia media de los *taps* se supone que atenúa exponencialmente el retardo por desfase. El desvanecimiento se implementa mediante la variación de la amplitud con respecto al tiempo de cada *tap*. Dependiendo de las distribuciones del desvanecimiento de los *taps*, el canal puede estar ajustado con una fuerte conexión en línea de vista entre *Tx* y *Rx*, lo que nos lleva a un desvanecimiento de Rice, y sin línea de vista a un desvanecimiento de Rayleigh. Cada *tap* puede caracterizar a un solo espectro *Doppler*.
- **Modelo *Ray-Based*:** Para este enfoque, se describe de forma muy precisa el entorno de propagación electromagnética, para poder hacerlo corresponder a un modelo de software, esto incluye el modelado detallado de todos los objetos que afectan a la propagación de la onda, como son los vehículos, edificios, la propia carretera, señales de tráfico, follaje, entre otros. El comportamiento de la dispersión de estos objetos debe ser representado con precisión. Después de que el modelo de software se genera, la propagación de las ondas es simulada mediante la determinación de todos los caminos posibles a partir de *Tx* a *Rx*.

Esto proporciona una simulación muy realista del canal de propagación. Estos modelos ofrecen, y exigen, una gran cantidad de detalles, por lo que tienden a tener una gran complejidad computacional.

- **Modelo estocástico *Geometry-Based*:** Para estos modelos la geometría del entorno de la propagación es generada aleatoriamente, de acuerdo a determinadas distribuciones estadísticas. Para esta clase de modelos, se ha mostrado que las principales contribuciones en la respuesta al impulso del canal son: la dispersión determinista y los componentes de la dispersión difusa. El componente en línea de vista tiene una alta ganancia, siempre y cuando no haya un camino directo desde Tx a Rx , el componente pierde ganancia cada vez que un objeto obstruye el camino directo, es decir, la sombra. La contribución de la dispersión difusa, derivada de los edificios circundantes, otras estructuras a lo largo de la carretera, o follaje, forman una parte de la ganancia del canal general.

2.1.7. Estándar IEEE 802.11p

La petición de la Comisión Federal de Comunicaciones para el uso de la banda de frecuencia de los 5.9 GHz se puso en marcha en 1999 y los trabajos de normalización iniciaron el grupo *ASTM E17.51* basada en el estándar IEEE 802.11a. En el año 2002, la norma *ASTM E2213-02* fue aprobada y aceptada como base para los sistemas con banda de frecuencia 5.9 GHz para los sistemas de transporte inteligente (*ITS*) en los Estados Unidos. La normalización fue trasladada al grupo de trabajo de la IEEE 802.11 y en

septiembre de 2004 se conformó el grupo de trabajo *WAVE*, para tener la primera versión del estándar IEEE 802.11p en febrero de 2006.

En el estándar IEEE 802.11p se han publicado una serie de especificaciones de la capa física y el Control de Acceso al Medio (*MAC*) para permitir las comunicaciones en las redes vehiculares en el espectro de los 5.9 GHz. Dichas especificaciones serán detalladas en esta sección.

La capa física es una variación del estándar IEEE 802.11a, el cual emplea 64 subportadoras *OFDM*, 52 de las 64 subportadoras se utilizan para la transmisión real que consta de 48 subportadoras de datos y 4 subportadoras piloto. Las señales piloto se utilizan para localizar el ruido en la frecuencia y fase por desplazamiento. Los símbolos de formación cortos y largos, que están situados al comienzo de cada paquete de datos, se utilizan para la detección de la señal. La estimación del desfase de la frecuencia, la sincronización del tiempo, y la estimación de canal. Un tiempo de guarda en cada símbolo de datos *OFDM* elimina la interferencia entre símbolos, la cual ocurre por la propagación con trayectoria múltiple. Con el fin de luchar contra el desvanecimiento del canal, los bits de información se codifican y se intercalan. La capa física del IEEE 802.11p tiene exactamente el mismo procesamiento de señal y especificaciones del IEEE 802.11a con excepción de los siguientes cambios:

1. Como ya se había mencionado, IEEE 802.11p opera en la banda de frecuencia de los 5.9 GHz y trabaja con un ancho de banda de 75 MHz dividido en 7 canales de 10 MHz cada uno, quedando 5 MHz como margen de seguridad. El canal central es el canal de control en donde todos los mensajes que necesiten fiabilidad son difundidos, el resto de

los canales son canales de servicio en donde la comunicación de baja prioridad es llevada a cabo. Además, dos canales de servicio adyacentes pueden ser empleados como un solo canal de 20 MHz.

2. Para soportar comunicaciones de larga distancia, en el estándar se definen cuatro clases de *Effective Isotropic Radiated Power*, que es la cantidad de energía que tendría que ser emitida por una antena isotrópica. El valor más alto es de 44.8 dBm (30 W) para los vehículos de emergencia.
3. Para aumentar la tolerancia a los efectos de la propagación por trayectoria múltiple se utiliza un ancho de banda de 10 MHz, por lo que el resto de los parámetros de IEEE 802.11p en comparación con los de IEEE 802.11a se duplican.
4. Para sincronizar el intercambio de los canales y que todos los vehículos e infraestructuras se encuentren en el canal de control cuando es requerido, se hace uso de una referencia de tiempo global como un Tiempo Universal Coordinado (*UTC* por sus siglas en inglés) que puede ser provisto por un sistema de navegación satelital.

Para priorizar el acceso en IEEE 802.11p se utiliza el acceso al canal distribuido mejorado (*EDCA*) presentado originalmente en IEEE 802.11e, el cual incluye el mecanismo *escuchar antes de hablar* y un *backoff* aleatorio. El acceso al canal priorizado es provisto por las cuatro siguientes clases: *background* (*AC_BK*), *best effort* (*AC_BE*), *voice* (*AC_VO*), y *video* (*AC_VI*).

El esquema *EDCA* se basa en el acceso múltiple con detección de portadora para evitar colisiones (*CSMA/CA*). Con esta técnica una estación que

desea transmitir debe monitorear el medio antes de que realice la transmisión para determinar si está ocupado o no. En particular, una estación inalámbrica con un flujo de datos a transmitir, de alguna de las clases (AC) mencionadas anteriormente, deberá monitorear el medio antes de intentar transmitir una trama, si el medio se detecta como ocupado, la estación retrasa la transmisión para evitar colisiones con otros nodos. El *backoff* se calcula aleatoriamente de acuerdo a una distribución uniforme sobre el intervalo $[0, CW[AC]]$, donde $CW[AC]$ es la ventana de contienda para la clase AC . En la primera transmisión, $CW[AC]$ es igual a $CW_{min}[AC]$ y se duplica en cada retransmisión con un límite máximo igual al máximo de $CW[AC]$. El contador de *backoff* se decrementa al final de cada ranura de tiempo, mientras que el medio se encuentre inactivo, si durante la cuenta hacia atrás del *backoff* el canal se detecta como ocupado, entonces la cuenta se detiene y se reanuda cuando el canal esté inactivo durante un periodo de tiempo de acuerdo al AC . La trama se transmite cuando el temporizador del *backoff* llegue a cero.

2.2. Difusión de información en sistemas WAVE (Broadcast)

El canal de control está destinado para transmitir mensajes de seguridad críticos, los *beacons* y mensajes para el establecimiento de la conexión de los canales de servicio (WSA). Una carga de tráfico en condiciones normales para el canal de control incluye la generación de mensajes periódicos de *beacons*, así como $WSAs$ y, sólo en caso de emergencia, mensajes de seguridad que son enviados para alertar de eventos de peligro en la carretera.

Los *beacons* son indispensables para apoyar las aplicaciones vehiculares que requieran información precisa y oportuna, también son importantes para ofrecer servicios como el descubrimiento de vecinos, algoritmos de encaminamiento proactivos, o estrategias de difusión de seguridad inteligentes. Para cumplir los requisitos de dichas aplicaciones, la tasa de generación típica de *beacons* es de 10 Hz [19], es decir, una vez cada intervalo de sincronización *WAVE*. Esto implica una gran carga en el canal cuando la cantidad de vehículos es alta, para evitar dicha carga podemos encontrar en la literatura adaptaciones en la potencia de transmisión [20] o en la tasa de generación de *beacons* [21].

Todos los paquetes provenientes de la capa de aplicación son enviados a la capa *MAC* sólo durante el intervalo del canal de control. Además, para evitar que múltiples dispositivos transmitan simultáneamente, todas las transmisiones se retrasan un *backoff* al azar en el comienzo del intervalo del canal de control. Debido a la naturaleza de los *beacons* y los mensajes para el establecimiento de comunicación de los canales de servicio, es razonable suponer que su tiempo de vida está limitado al intervalo del canal de control, después de este periodo se descartan las tramas no transmitidas, como consecuencia, no hay necesidad de modelar colas *MAC* para los mensajes *broadcast*.

Los mensajes *broadcast* para la difusión de información en *VANETs* ofrecen la posibilidad a diferentes aplicaciones de brindar información para la seguridad de los conductores. Dicha difusión debe hacerse lo más rápido posible, aunque cada aplicación tiene sus propios requerimientos. Además, cada aplicación inicia la difusión de información bajo diferentes circunstancias,

en [22] las definen de la siguiente manera: *Time-Limited Periodic Messages Broadcasting on Event (TLPMBonE)*, *Periodic Triggered by Vehicle Mode (PTbyVM)*, *V2X Co-operative awareness (V2xCoA)*, *Time-Limited Periodic Messages Geocasting on Event (TLPMGonE)*, *Authoritative Message Triggered by Traffic Management Entity (AMTbyTME)*, *Temporary Messages Broadcasting on Event (TMBonE)*, *Temporary Messages Geocasting on Event (TMGonE)*, and *Periodic Co-operative Awareness Broadcast (PCoABcast)*. En la Tabla 2.1 resumimos las aplicaciones cooperativas para la seguridad vial, incluyendo su tipo de inicio que acabamos de mencionar, la frecuencia mínima de generar los mensajes *broadcast*, y su correspondiente tiempo mínimo para alcanzar su objetivo.

En este trabajo, nos enfocamos en los algoritmos de difusión para mensajes de emergencia, o que requieran un tiempo crítico muy chico. Dichos algoritmos deben resolver al menos uno de los principales problemas que enfrentan las *VANETs*; es decir, el *broadcast storm* y la desconexión de la red.

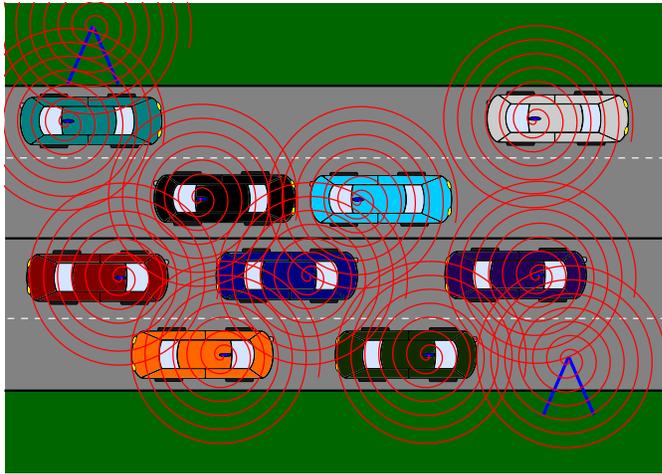
2.2.1. Algoritmos de difusión de información para los sistemas WAVE

Las *VANETs* son consideradas un caso específico de las redes móviles ad hoc (*MANETs* por sus siglas en inglés), por lo que comparten muchos de los beneficios y problemas que presentan estas últimas. Debido a la movilidad constante de los vehículos, son necesarios protocolos de encaminamiento dinámicos. Sin embargo, estos protocolos sufren de dos problemas principales, uno de ellos es el problema del *broadcast storm* y el otro es el problema

TABLA 2.1: Aplicaciones cooperativas de seguridad vial.

Aplicación	Tipo de comunicación	Frecuencia mínima	Tiempo crítico
Luces de freno de emergencia	<i>TLPMBonE</i>	10 Hz	< 100 ms
Función de seguridad fuera de condiciones normales	<i>TLPMBonE</i>	1 Hz	< 100 ms
Avisos de emergencia	<i>PTbyVM</i>	10 Hz	< 100 ms
Aviso de vehículo lento	<i>PTbyVM</i>	2 Hz	< 100 ms
Aviso de motocicleta cerca	<i>V2xCoA</i>	2 Hz	< 100 ms
Aviso de camino vulnerable	<i>V2xCoA</i>	1 Hz	< 100 ms
Aviso de conducción en sentido contrario	<i>TLPMBonE</i>	10 Hz	< 100 ms
Aviso de vehículo estacionado	<i>TLPMBonE</i>	10 Hz	< 100 ms
Aviso de condición del tráfico	<i>TLPMBonE</i> , <i>TLPM-GonE</i> , o <i>AMTbyTME</i>	1 Hz	N/A
Aviso de violación de señalamiento	<i>TMBonE</i> o <i>AMTbyTME</i>	2 Hz	< 100 ms
Aviso de trabajadores en el camino	<i>TMBonE</i> o <i>TMGonE</i>	10 Hz	< 100 ms
Datos de flotillas de vehículos descentralizados	<i>TLPMBonE</i>	1 Hz a 10 Hz	N/A
Aviso de rebase de vehículo	<i>V2xCoA</i>	10 Hz	< 100 ms
Asistencia para cambio de carril	<i>V2xCoA</i>	10 Hz	< 100 ms
Aviso para evitar colisiones	<i>V2xCoA</i>	10 Hz	< 50 ms
Reducción de reflejos cooperativa	<i>V2xCoA</i>	2 Hz	< 100 ms
Aviso de riesgo de colisión al dar vuelta	<i>V2xCoA</i>	10 Hz	< 100 ms
Aviso de riesgo de colisión en tráfico	<i>V2xCoA</i>	10 Hz	< 100 ms
Asistencia para incorporarse a las vías	<i>V2xCoA</i>	10 Hz	< 100 ms
Notificación de ubicación peligrosa	<i>TMBonE</i> o <i>AMTbyTME</i>	10 Hz	N/A
Aviso de colisión en intersecciones	<i>PCoABcast</i>	10 Hz	< 100 ms
Advertencia cooperativa de colisión cercana	<i>V2xCoA Unicast</i>	10 Hz	< 100 ms
Aviso de colisión de un RSU	<i>TLPMBonE</i>	10 Hz	< 100 ms

de la desconexión de la red. El problema del *broadcast storm* ocurre cuando se transmite un mensaje y todos, o muchos, de los receptores vuelven a transmitir dicho mensaje, y de nueva cuenta los receptores repiten el proceso, tal como podemos apreciar en la Figura 2.5. Este comportamiento puede ocasionar que la red se sature con mensajes *broadcast* que, tal vez, ya no son

FIGURA 2.5: Problema *broadcast storm*.

necesarios, es decir, son redundantes. El problema de la desconexión ocurre por la movilidad de los vehículos, constantemente pueden entrar y salir del rango de transmisión, lo cual provoca que un proceso de difusión pueda no completarse al no estar en el rango de transmisión al menos un vehículo.

Para mejorar el funcionamiento de los mensajes *broadcast*, se han propuesto diversos protocolos para este tipo de mensajes. De [23] y [24] podemos resumir los tipos de protocolos de difusión más importantes presentados en la literatura.

- **Protocolos de inundación:** en estos protocolos, cada vehículo que recibe un mensaje de difusión, que no había recibido previamente, difunde nuevamente el mensaje a sus vecinos. Este proceso se repite hasta que todos los vehículos tienen la misma información. Para decidir si un mensaje ya había sido recibido antes, es decir, si es un mensaje redundante, es necesario mantener en un *buffer* por algún tiempo los mensajes recibidos. Este tipo de protocolos funcionan bien para redes

dispersas. Sin embargo, esto puede conducir fácilmente al problema *broadcast storm* para redes muy densas, además de aumentar la probabilidad de colisiones y redundancia de información. Estos protocolos son simples y heredados de las *MANETs*, propuestos ya hace tiempo como en [25].

- **Protocolos probabilísticos:** aquí no todos los vehículos que reciben un mensaje de difusión lo retransmiten, cada receptor decide si difunde nuevamente el mensaje con base en una probabilidad fijada previamente. Estos protocolos reducen la redundancia de mensajes en la red, las colisiones y la contención por el medio en redes densas. Sin embargo, en redes dispersas, es probable que no todos los vehículos reciban los paquetes. Un ejemplo de estos protocolos es presentado en [26].
- **Protocolos basados en contadores:** son una forma de agregar información en la toma de decisión para difundir el mensaje recibido. Con esta técnica se reduce la redundancia, si un receptor recibe muchas veces el mismo mensaje entonces, entonces no lo difunde, pero si el receptor recibe pocas veces el mismo mensaje, entonces lo difunde a sus vecinos para tratar de lograr que todos los vehículos tengan la misma información. También, se han presentado propuestas combinando este esquema con los probabilísticos como en [27].
- **Protocolos basados en distancia:** la decisión de difundir el paquete recibido se toma basándose en la distancia que existe entre el receptor y el emisor, si se encuentran lejos, entonces se difunde nuevamente para lograr un mayor alcance de la difusión. Este tipo de protocolos

pueden presentar retardos grandes, y son altamente variables en su desempeño dependiendo el umbral elegido para determinar si se debe o no transmitir el paquete.

- **Protocolos basados en el tráfico o vecinos:** estos protocolos toman la decisión de difundir un paquete tomando en cuenta el tráfico de las vías, esto implica tener conocimiento de dicho tráfico mediante algún mecanismo. También, pueden depender de la información de sus vecinos [28], motivo por el cual estos protocolos tienen un pobre desempeño si la red es muy dispersa.
- **Protocolos oportunistas:** En estos protocolos la idea principal es emplear un proceso de contención, en donde el vehículo más lejano es elegido de manera oportunista para difundir nuevamente el paquete.

Los paquetes de difusión son de suma importancia para las redes vehiculares, pues son utilizados, entre otros, para compartir periódicamente información de posición y movimiento del vehículo, o por aplicaciones de seguridad que requieren difundir información crítica para los automovilistas. Para estas últimas, es imprescindible que los protocolos de difusión sean eficientes tanto en tiempo, como en redundancia de paquetes. La latencia en los paquetes de difusión de seguridad es muy importante, pues la información sólo es útil si ésta llega a tiempo. Con lo que respecta a la redundancia, es ideal que los paquetes no sean retransmitidos por todos los nodos, pues esto conduciría al problema del *broadcast storm*. Han sido propuestos diversos algoritmos que tratan de mitigar dichos problemas, estos algoritmos utilizan principalmente las técnicas mencionadas anteriormente, algunos ejemplos de estos algoritmos son: *IVG* [29], *UMB* [30], *DV-CAST* [31], *Bounding Algorithm* [32],

GEDDAI [33], *OppCast* [34], *NoG+DTA* [35], *R-OB-VAN* [36], por mencionar algunos. Un aspecto a considerar en el trabajo de investigación a desarrollar en esta tesis de doctorado, es la *MAC*. Ya que es la capa que nos brinda acceso al medio, es importante conocer el comportamiento de los diferentes protocolos propuestos para las *VANET*. El desempeño de los protocolos *MAC* se ve afectado por la naturaleza de las *VANET* como la alta movilidad de los vehículos, la terminal oculta, la escalabilidad y las muy distintas necesidades de las aplicaciones de seguridad. En [37], se presenta un estudio de los protocolos *MAC* más importantes para las *VANET*. En ese trabajo se muestra que la mayoría de los protocolos *MAC* se concentran en la difusión de mensajes de seguridad. También, se aprecia que el protocolo *MAC* del estándar IEEE 802.11p es el que más características brinda y el más fácil de configurar. A continuación, presentaremos la idea general de los algoritmos encontrados en la literatura que, a nuestro entender, ofrecen una difusión de mensajes que cubren, en la mayoría de lo posible, las necesidades antes mencionadas.

2.2.1.1. Bounding algorithm

A pesar de que *Bounding algorithm* [32] fue presentado originalmente para las *MANET*, notamos cierto potencial al aplicarlo sobre una red vehicular. Este algoritmo combina las técnicas basadas en distancia y las basadas en conteo. En la Figura 2.6 se muestra una representación gráfica del algoritmo, en donde únicamente los nodos dentro del área sombreada son quienes pueden retransmitir el mensaje. El modo de operar del algoritmo es el siguiente:

1. Se establece d_{\min} como la distancia entre el emisor y el receptor. Si es la primera vez que se recibe el mensaje, se inicializa un contador $c = 1$, en otro caso se incrementa el contador en una unidad.
2. Sean D_{TH} y C_{TH} umbrales para la distancia y para el contador de paquetes respectivamente. Si $d_{\min} \geq D_{\text{TH}}$ y $c < C_{\text{TH}}$, entonces se procede al punto 3. De lo contrario se procede al punto 5.
3. Esperar un número de ranuras aleatorias de entre 0 y 32. Si el mensaje es escuchado de nuevo, se interrumpe la espera y se regresa al punto 2. En otro caso, se transmite el mensaje y se procede al punto 4.
4. El mensaje está en el medio. El algoritmo termina.
5. Cancelar la transmisión del mensaje. El nodo tiene prohibido retransmitir el mensaje en el futuro. El algoritmo termina.

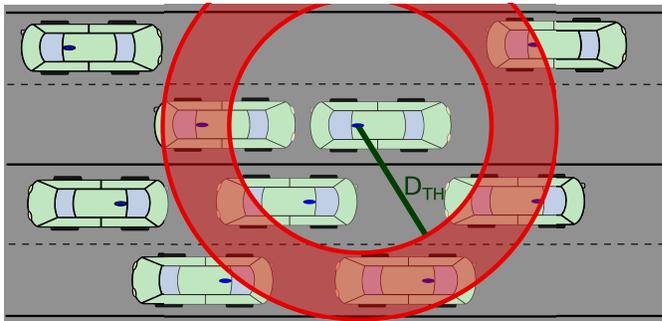


FIGURA 2.6: Representación gráfica del algoritmo *Bounding*.

2.2.1.2. GEDDAI

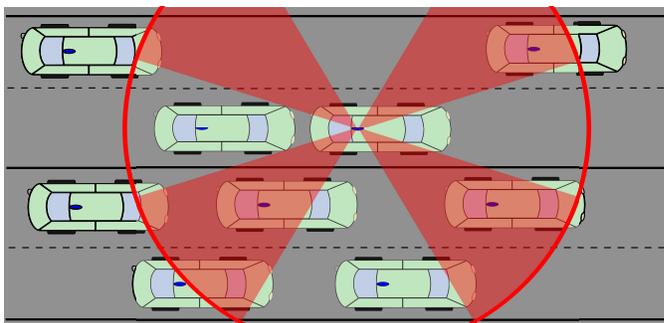
El principal objetivo del algoritmo *GEDDAI* [33] es difundir información de seguridad dentro de un área de relevancia. Para lograr esto es necesario

que los vehículos sepan su ubicación, es decir, que cuenten con un *GPS*. Los vehículos tienen dos distintas prioridades de retransmisión, dependiendo de si se encuentran en un área determinada o fuera de ésta. El objetivo de dicha área, denominada *Sweet Spot*, es mitigar el problema del *Broadcast Storm*, evitando que nodos continuos retransmitan el mensaje, pues tienen distintas prioridades de transmisión. Las áreas *Sweet Spot* propuestas por los autores se aprecian en la Figura 2.7. *GEDDAI* opera de la siguiente manera:

1. Cuando un nodo V recibe un mensaje m , verifica si éste se ha recibido por primera vez, si es así, entonces se procede al punto 3 en otro caso se procede al punto 2.
2. Si m ya está en la lista de espera para su retransmisión, entonces tanto el mensaje de la lista como el que se acaba de recibir se cancelan y se descartan. En otro caso, sólo se descarta m .
3. Si el nodo V se encuentra dentro de un *Sweet Spot*, entonces se calcula el tiempo de espera para la prioridad 1 y se pone a m en la lista de espera para su retransmisión. En otro caso, se calcula el tiempo de espera para la prioridad 2 y se pone a m en la lista de espera para su retransmisión.

2.2.1.3. OppCast

El algoritmo *OppCast* [34], adopta el concepto de encaminamiento oportunista, recientemente incorporado en las redes vehiculares. La idea principal del encaminamiento oportunista, es introducir un proceso de contención,

FIGURA 2.7: Zonas *Sweet Spot* propuestas por los autores de *GEDDAI*.

donde el nodo más lejano en la dirección de la difusión, es seleccionado de forma oportunista. La idea principal del algoritmo es la siguiente:

1. Cuando un nodo V recibe un mensaje m de un nodo U , V verifica si m ha sido recibido por primera vez, si es así pasa al punto 2. En otro caso, pasar al punto 3
2. Se determina si aún se encuentra dentro de la zona de candidatos a retransmitir el mensaje de U y se pasa al punto 4, de lo contrario no hace nada.
3. Se calcula la probabilidad acumulada de recepción de paquete para cada uno de los vecinos de V . Si la mínima probabilidad acumulada no es mayor a un umbral establecido, entonces, si V es el más cercano al punto medio de la distancia entre ambos nodos retransmisores (el emisor y el retransmisor), pasa al punto 4, en otro caso el algoritmo termina.
4. Espera un tiempo determinado por la distancia entre U y V , mientras más lejos menos espera. Si dicho tiempo expira y no se recibe un *BACK*

(*Broadcast acknowledgement*) de algún otro nodo, entonces V envía un *BACK* para que los demás nodos interrumpen su espera y terminen su algoritmo. Inmediatamente después del *BACK*, V retransmite el mensaje m y termina el algoritmo.

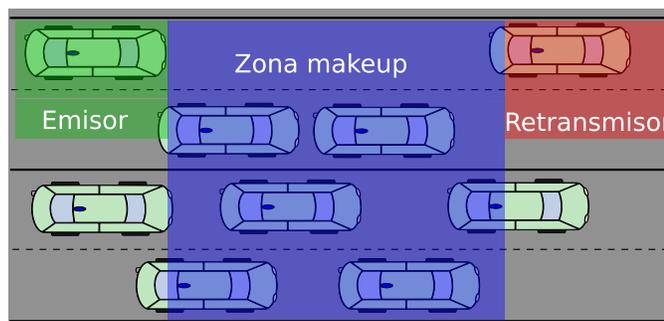


FIGURA 2.8: Zonas creadas por el algoritmo *OppCast*.

Las zonas creadas por este algoritmo se muestran en la Figura 2.8.

2.2.1.4. Non GPS Data Dissemination (NoG+DTA)

El algoritmo *NoG+DTA* [35] es una combinación de las técnicas de densidad y de topología (*DTA*), junto a un algoritmo para la difusión de mensajes que no requiere de ningún conocimiento geográfico (*NoG*). El principal objetivo de *DTA* es obtener un conjunto conectado dominante de nodos (*CDS* por sus siglas en inglés), los cuales serán los candidatos a retransmitir los mensajes, tal como se muestra en la Figura 2.9.

Para que un nodo V decida si pertenece o no a un *CDS*, el algoritmo *DTA* realiza lo siguiente:

1. Si V tiene un número mayor de vecinos que cualquiera de estos, entonces él forma parte del CDS , esta es la condición de densidad.
2. Si V no tiene un número mayor de vecinos que cualquiera de estos, entonces se toma la condición de topología. Para esto se revisa la cobertura de los nodos, el nodo V podrá ser candidato a formar parte del CDS si tiene un vecino aislado, como se muestra en la Figura 2.10

El funcionamiento de NoG es el siguiente:

1. Al recibir un *beacon*, se actualiza la lista de vecinos y el CDS mediante DTA .
2. Al recibir un mensaje m , el receptor verifica si éste no se encuentra en la lista de mensajes P que esperan a ser retransmitidos, en otro caso se elimina m de la lista P .
3. Si el nodo pertenece al CDS , y es la primera vez que se recibe el mensaje m , entonces se retransmite el paquete con un retardo no mayor a 10ms. En otro caso, m se agrega a la lista P .

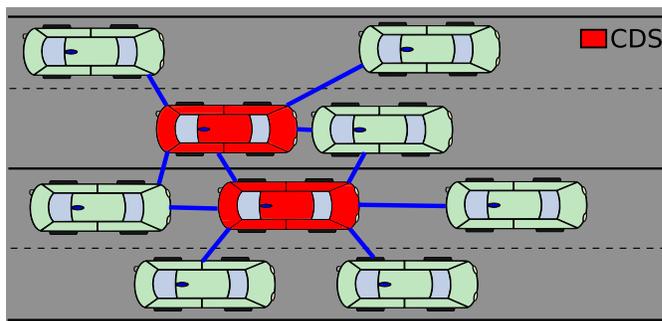


FIGURA 2.9: Ejemplo de un conjunto conectado dominante (CDS)

4. Para lidiar con las pérdidas de paquetes, el algoritmo revisa la lista de paquetes recibidos por sus vecinos, la cual viene incluida en los *beacons*. Por un lado, si un vehículo detecta que alguno de sus vecinos no recibió el mensaje m , entonces agrega m a la lista de paquetes que esperan a ser retransmitidos. Por otro lado, si el vehículo detecta que su vecino recibió un paquete que él no ha recibido, entonces difunde inmediatamente un *beacon* para que sus vecinos sepan que él no ha recibido dicho paquete.

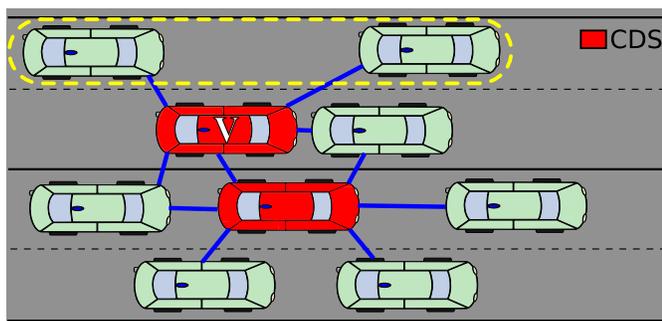


FIGURA 2.10: Ejemplo de una condición de topología.

2.2.1.5. OB-VAN

La idea detrás de *OB-VAN* [38] es simple, de manera similar al algoritmo *OppCast*, se elige de manera oportunista al nodo más lejano. Para esto hace uso de la distancia entre el emisor y receptor, por lo que es necesario que los vehículos vengan equipados con un *GPS*. Con la distancia entre emisor y receptor forma periodos de escucha y de transmisión, para que los nodos contiendan por ser el siguiente nodo retransmisor. Para generar dichos periodos de escucha y transmisión, la distancia es convertida a un número

binario, de esta manera un 0 representa un periodo de escucha, mientras que un 1 representa un periodo de transmisión. En la Figura 2.11, se puede apreciar un proceso de contención para elegir al próximo nodo retransmisor.

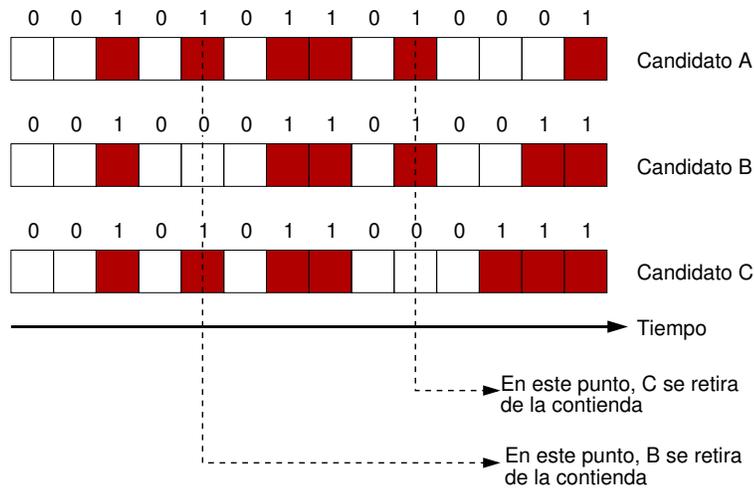


FIGURA 2.11: Ejemplo de una contienda en *OB-VAN*.

Los candidatos A, B y C comienzan con dos periodos de recepción, uno de transmisión en el que envían un mensaje para avisar que siguen en la contienda, y de nuevo un periodo de recepción. Después de esto, los candidatos A y C tienen un periodo de transmisión mientras que el candidato B se encuentra en un periodo de recepción, por lo tanto B se retira de la contienda cuando reciba por lo menos un mensaje de A o de C. Éstos candidatos, continúan hasta que A se encuentra en un periodo de transmisión y C en uno de recepción, por lo tanto C deja la contienda. A debe terminar el resto de sus periodos y así convertirse en el nodo retransmisor.

Capítulo 3

Modelos de movilidad

Dado el reciente interés por analizar el tráfico en las autopistas, calles y carreteras, por mencionar algunos, se han propuesto distintos modelos matemáticos para describir el comportamiento de los vehículos y poder realizar mediciones sobre el estado del tráfico. Si nos concentramos en el comportamiento del tráfico, tenemos dos tipos de modelos, los **modelos macroscópicos** y los **modelos microscópicos**. Los **modelos macroscópicos** se basan, principalmente, en la densidad de vehículos o el flujo de éstos, mientras que los **modelos microscópicos** se concentran en el comportamiento individual de cada vehículo. Sin embargo, para poder modelar el tráfico vehicular se requiere de diversos componentes. La mayoría de éstos en la actualidad incluyen un mapa topológico, o al menos un grafo para la movilidad. Desafortunadamente, no incluyen limitaciones de velocidad. La generación de vehículos está ampliamente ausente en la mayoría de los modelos. El comportamiento del conductor se limita a las aceleraciones o desaceleraciones suaves.

De [39], podemos clasificar los modelos de movilidad en las siguientes categorías: modelos sintéticos, modelos basados en observaciones y modelos basados en trazas.

3.1. Modelos sintéticos

Los modelos sintéticos incluyen todos los modelos matemáticos, los cuales a su vez se clasifican de la siguiente manera; **modelos estocásticos**, modelos que contienen movimientos puramente aleatorios; **modelos de flujo de tráfico**, que modelan la movilidad vehicular como un fenómeno hidrodinámico; **modelos de vehículos seguidores**, donde el comportamiento de cada vehículo se modela de acuerdo a los vehículos que están por delante; **modelos basados en colas** que modelan las carreteras como colas *FIFO* (Primero en entrar, primero en salir) y los vehículos como clientes; **modelos de comportamiento**, donde cada movimiento está determinado por reglas de conducta tales como las influencias sociales. El objetivo general de los modelos de movilidad sintéticos es, primero, tratar de entender un movimiento particular, luego desarrollar un modelo matemático, y finalmente, tratar de reproducirlo. Sin embargo, algunos movimientos, o interacciones, a menudo hacen un modelo matemático demasiado complejo o imposible de implementar.

Para refinar los modelos sintéticos, o validarlos, algunas compañías y grupos de investigadores han desarrollado simuladores de tráfico vehicular. Los simuladores destacados son PARAMICS [40], CORSIM [41], VISSIM [42], TRANSIMS [43] y SUMO [44], los cuales son capaces de simular tráfico microscópico urbano, consumo de energía, contaminación o nivel de ruido. Sin

embargo, la mayoría de estos simuladores no arrojan trazas compatibles con los simuladores de redes actuales, o se requiere comprar una licencia para ser utilizados.

3.2. Modelos basados en observaciones

Los modelos basados en observaciones extraen los patrones de movilidad de observaciones o encuestas, para obtener información macroscópica del tráfico. Dicha información es precisamente su limitación, pues al solo obtener información macroscópica, no se puede tener un modelo detallado.

3.3. Modelos basados en trazas

Mediante el uso de trazas, varios equipos de investigación han sido capaces de extraer modelos de movilidad que reflejen de manera más realista los patrones de movimiento que experimentamos en la vida real. Si se obtuviera una idea de las distribuciones reales de la velocidad, tiempos de pausa, o movimiento vehicular mediante el uso de trazas reales, podríamos configurar los modelos sintéticos para obtener un modelo más realista. Sin embargo, es difícil obtener las trazas reales de los movimientos vehiculares para las distintas situaciones que se pueden presentar.

3.4. Modelo IDM

Treiber, Hennecke y Helbing proponen un modelo de movilidad microscópico, que pertenece a la clasificación de modelos de vehículos seguidores, de los modelos sintéticos. La propuesta es de una sola vía y es llamado *Intelligent Driver Model* (IDM) [45]. A diferencia de la mayoría de los modelos similares, IDM es simple, sólo tiene unos pocos parámetros intuitivos con valores reales, reproduce una dinámica colectiva y realista. Y también posee una plausible aceleración y deceleración individual para cada vehículo. IDM es básicamente una función continua de la velocidad del vehículo, la distancia entre vehículos y la diferencia de velocidades entre los mismos. El modelo tiene las siguientes propiedades que lo hacen interesante: equilibrio del tráfico, aceleración individual de cada vehículo, reacción mediante frenado para acercamientos a alta velocidad, reacción ante pequeñas distancias entre vehículos. En la ecuación 3.1, mostramos la representación matemática de IDM.

$$\dot{v}_\alpha = a \left[1 - \left(\frac{v_\alpha}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v_\alpha, \Delta v_\alpha)}{s_\alpha} \right)^2 \right] \quad \text{donde} \quad (3.1)$$

$$s^*(v_\alpha, \Delta v_\alpha) = s_0 + v_\alpha T + \frac{v_\alpha \Delta v_\alpha}{2\sqrt{a^\alpha b^\alpha} s_\alpha}$$

Los parámetros que se introducen al modelo y que corresponden a la ecuación 3.1 son los siguientes:

- v_0 : Es la velocidad a la que se desea que vaya el vehículo con la vía libre.

-
- v_α : Es la velocidad actual del vehículo α .
 - \dot{v}_α : Es la velocidad del vehículo α en un instante t .
 - s_0 : Es la distancia mínima que se establece entre un vehículo y otro.
 - s_α : Es la distancia actual entre el vehículo α y otro vehículo enfrente.
 - T : Es el tiempo mínimo posible con el vehículo de enfrente.
 - a^α : Es la aceleración máxima del vehículo α .
 - b^α : Es la desaceleración suave del vehículo α .
 - δ : Es el exponente de aceleración, usualmente tiene valor de 4

Capítulo 4

Herramientas de simulación

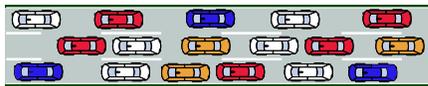
Para realizar nuestras simulaciones y poder evaluar las distintas técnicas de difusión de información en *VANET* utilizamos el simulador de eventos discretos *NS-3* [46], ya que se encuentra alineado con las necesidades de la simulación de redes para la investigación moderna, alienta la contribución de la comunidad, la revisión y validación del software.

El simulador *NS-3* implementa la capa física y parte de la *MAC* conforme está establecido en el estándar IEEE 802.11p. Con la finalidad de adecuarnos más a los sistemas *WAVE*, utilizamos el módulo desarrollado por Junling Bu [47]. Dicho módulo, brinda la operación multicanal a *NS-3*. Con esta mejora, implementamos un *CCH* y un *SCH*. En el *CCH*, los vehículos transmiten los *beacons* y los mensajes de emergencia. En el *SCH*, no realizamos ninguna transmisión, sin embargo lo agregamos con la finalidad de detener el *CCH* cada 50 ms y observar cómo esto afecta a los algoritmos. En la Tabla 4.1, mostramos la configuración general de la red.

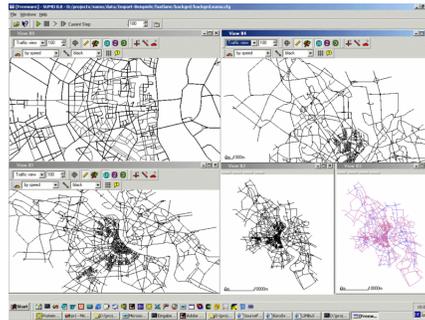
TABLA 4.1: Configuración de la red.

Parámetro	Valor
Potencia de transmisión	20 dBm
Rango de comunicación	300 m
Modelo de pérdidas por propagación	Nakagami
Modelo de retardo de propagación	<i>Constant speed propagation delay model</i>
Duración de <i>SCH</i> y <i>CCH</i>	50 ms
Tasa de generación de <i>beacons</i>	10 Hz
Tasa de generación de paquetes de emergencia	$\frac{1}{10}$ Hz

Para la movilidad de los vehículos utilizamos *SUMO* [44]. Éste nos permite generar distintas trazas de movilidad para los vehículos, en distintos escenarios. Es posible crear escenarios sencillos como el de la Figura 4.1a o tan complejos como en la Figura 4.1b. Para probar los algoritmos antes mencionados, se generaron trazas de movilidad para una vía de tres carriles y con distintas densidades de vehículos.



(a)



(b)

FIGURA 4.1: Escenario de movilidad.

Cuando un vehículo transmite un mensaje, se disemina en la dirección opuesta del flujo de los vehículos hasta una distancia de 1 km. La longitud de la

carretera es una consideración relevante en este escenario. Por lo tanto, consideramos una carretera de 3 km de longitud para enfocarnos en los vehículos localizados en el centro. Debido a la manera en que *SUMO* exporta la traza de movilidad en formato *NS-2*, si realizamos la simulación de la red en el kilómetro central de la pista, no tenemos que lidiar con los vehículos al inicio de la carretera donde están estáticos; De manera similar, no se tratan los vehículos al final de la carretera donde ya se han detenido, pues la traza ya en formato *NS-2* contiene a todos los vehículos desde un inicio. Cabe mencionar que en *NS-3* es posible utilizar trazas de movilidad en formato de *NS-2*.

TABLA 4.2: Configuración de los vehículos.

Parámetro	Valor
Aceleración	1.1 m/s ²
Desaceleración	5.0 m/s ²
minGap	0.1 m
Carril inicial	Random ^a
Velocidad inicial	Random ^b
Velocidad máxima	4.5 m s ⁻¹
Modelo de movilidad	SUMOKrauß

^a Con distribución uniforme para los valores [1, 2, 3].

^b Con distribución uniforme para valores en el intervalo [0, 4.5].

En la Tabla 4.2 listamos los parámetros que describen la movilidad de los vehículos. Consideramos un total de ocho trazas de movilidad, con diferentes densidades de tráfico. Para nuestros experimentos tenemos el conjunto {17, 34, 51, 71, 83, 102, 120} que representa el número promedio de vehículos que se encuentran en el área de interés. Es importante recalcar que la velocidad máxima elegida para los vehículos es de 4.5 m s⁻¹, la cual podría ser considerada lenta para una movilidad vehicular. Sin embargo, aún si los

vehículos viajaran a 80 ms^{-1} , estos solo se moverían 4 m en los 50 ms que dura el *CCH*. Más aún, los vehículos viajan a velocidades similares y en la misma dirección. Por lo tanto, no hay un cambio significativo en la topología de la red durante la transmisión, pero sí hay cambios durante toda la simulación, lo que nos permite tener diferentes experimentos. Es por eso que consideramos velocidades lentas para conseguir que se junten los vehículos y tener una gran densidad de éstos. En la Figura 4.2 mostramos de manera general la ejecución de las herramientas para obtener los datos necesarios para nuestro análisis, primero se le da un archivo de configuración a *SUMO*, éste nos da como resultado una traza de movilidad la cual se utiliza en *NS-3* para obtener finalmente la traza que contiene la actividad en la red.

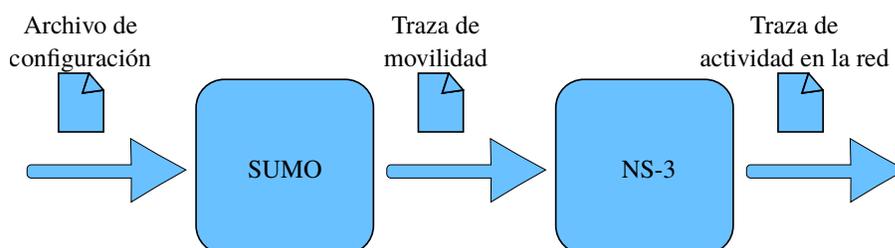


FIGURA 4.2: Diagrama de ejecución.

Capítulo 5

Fast-OB-VAN

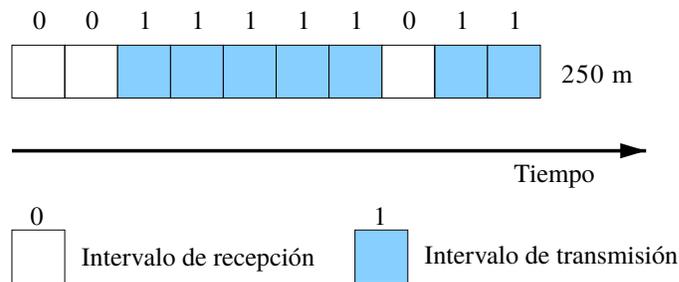
La primera aproximación que consideramos para optimizar la difusión de información en VANETs, es una mejora al algoritmo OB-VAN, mencionado en la Sección 2.2.1.5. Notamos que OB-VAN se podía mejorar, principalmente, en términos de la velocidad de difusión. Ya que ésta fue la principal mejora, de ahí el nombre que proponemos Fast-OB-VAN [4]. A continuación describimos el algoritmo.

5.1. Descripción del algoritmo *Fast-OB-VAN*

El retardo en la propagación de la información es una medida de desempeño altamente importante para las aplicaciones en las *VANETs*. Por esta razón, es de suma importancia mejorar dicha medida de desempeño en los algoritmos de difusión de información. Analizando cuidadosamente el algoritmo *OB-VAN* presentado en la Sección 2.2.1.5, nos dimos cuenta que le toma

mucho tiempo cubrir un área de interés. A *OB-VAN* le toma un tiempo considerable el completar el proceso de selección del mejor candidato. Por un lado, ya que *OB-VAN* utiliza *CDMA* para la señalización, el retardo se incrementa cuando evaluamos el algoritmo bajo el estándar IEEE 802.11p, esto es debido a que existe un mayor nivel de contienda en IEEE 802.11p que en *CDMA*. Por otro lado, pueden haber pérdidas y colisiones de los paquetes de señalización. Si un nodo no recibe correctamente uno de los mensajes de señalización, o los intervalos de secuencia se desincronizan, el proceso de selección puede no siempre elegir al mejor candidato para retransmitir el mensaje.

En este trabajo, adoptamos la idea principal del proceso de selección del mejor candidato de *OB-VAN*. Cuando un nodo recibe exitosamente un mensaje m por primera vez, se crean intervalos de tiempo de la misma forma que *OB-VAN* lo hace; es decir, como se muestra en la Figura 5.1. A diferencia de *OB-VAN*, nuestra propuesta transmite el mensaje m en lugar de mensajes de señalización. Entonces, los vehículos cuya distancia representada en bits tenga el bit más significativo en uno contendrán por transmitir el mensaje. Esto permite la transmisión del mensaje por los candidatos más lejanos, lo que implica dar saltos más grandes y cubrir el área más rápidamente. Cuando el mensaje m es recibido por segunda vez, sin importar si el receptor se encuentra en un intervalo de recepción o de transmisión, entonces el algoritmo debe terminar e ignorar recepciones futuras de dicho mensaje. Esto permite que vehículos más cercanos a la fuente transmisora sigan retransmitiendo el mensaje. Finalmente, *Fast-OB-VAN* trata los mensajes duplicados de la misma forma que *OB-VAN*. Los mensajes incluyen la posición de la última fuente que los transmitió, así como un número de secuencia. Por lo

FIGURA 5.1: Ejemplo de los intervalos creados por *OB-VAN*.

tanto, los vehículos mantienen una lista de los mensajes de emergencia recibidos para determinar si un mensaje ha sido recibido por primera vez o no. Los mensajes también incluyen la posición de la fuente generadora de dicho mensaje, por lo que los vehículos pueden determinar la distancia y detener el algoritmo cuando se alcance la distancia deseada.

Entonces, la principal diferencia entre *OB-VAN* y *Fast-OB-VAN* es lo que se envía durante los intervalos de transmisión. Esta mejora permite un gran incremento en el desempeño del algoritmo, y al mismo tiempo se adapta de mejor manera al estándar IEEE 802.11p, ya que *Fast-OB-VAN* toma en cuenta la contienda por el acceso al medio. *Fast-OB-VAN* también preserva la idea de ser un algoritmo oportunista, seleccionando al nodo más lejano posible para retransmitir. Una ventaja adicional de *Fast-OB-VAN* sobre *OB-VAN*, es que este último utiliza el *signaling burst*, lo que es incompatible con el estándar IEEE 802.11p. Finalmente, si dos vehículos están posicionados a la misma distancia, entonces dichos vehículos deben contender para retransmitir el mensaje. En el caso de *OB-VAN* esto es realizado por la función de coordinación distribuida (*DCF*), mientras que en *Fast-OB-VAN* esto se lleva a cabo con la función de acceso al canal distribuido mejorado (*EDCA*).

Algorithm 1 El algoritmo FAST-OB-VAN.

```

1: procedure RECEIVE(Packet P)
2:   if Has not covered the desired area then
3:     if Receives the packet P for the first time then
4:       BinaryDistance  $\leftarrow$  BinaryExpression(DistanceToSource)
5:       DelayBetweenIntervals  $\leftarrow$  Milliseconds(3)
6:       RebroadcastFlag  $\leftarrow$  True
7:       for  $i = 0$  to  $i < \text{Length}(\text{BinaryDistance})$  do
8:         if BinaryDistance[ $i$ ] = 1 then
9:           RandomTime  $\leftarrow$  MicroSeconds(Random(0, 2000))
10:          Delay  $\leftarrow$  (DelayBetweenIntervals  $\cdot$   $i$ ) + RandomTime
11:          Schedule(Delay, Rebroadcast, P)
12:        else
13:          RebroadcastFlag  $\leftarrow$  False
14:        else
15:          End the algorithm
16: procedure REBROADCAST(Packet P)
17:   if RebroadcastFlag = True then
18:     Broadcast(P)
19:   else
20:     End the algorithm

```

Presentamos el pseudocódigo de *Fast-OB-VAN* en el Algoritmo 1. Como se puede observar, el algoritmo consta de dos funciones. La primera función es la de *Receive*, lo primero que hace es revisar si ya se ha cubierto el área deseada, después comprueba si el paquete ha sido recibido por primera vez. A continuación, se realiza el procedimiento de convertir la distancia en binario para que las retransmisiones sean agendadas, pero sólo en las casillas donde el número binario corresponda a 1. La segunda función del algoritmo es la de *Rebroadcast*, esta función se activa cuando se cumple el tiempo de espera con el que se fue agendada cada retransmisión en la función anterior. Únicamente revisa la bandera de retransmisión, si está en verdadero, entonces realiza la retransmisión del paquete, de lo contrario el algoritmo termina.

5.2. Medidas de desempeño

Con el fin de medir el desempeño de nuestra propuesta, estudiamos cuatro parámetros. El tiempo que le toma al algoritmo cubrir el área de interés, para este trabajo 1 km, esto nos permite saber si los algoritmos cumplen el requerimiento de retardo que necesitan las aplicaciones. También, medimos el número de veces que el mensaje se retransmite, con esto podemos saber qué tanto contribuye el algoritmo a la congestión de la red. Otro parámetro que medimos es la cantidad de vehículos dentro del área de interés, que reciben correctamente el mensaje, esto nos permite saber qué tan confiable es el algoritmo pues es importante que todos los vehículos dentro del área de interés reciban el mensaje ya que se trata de mensajes de emergencia y seguridad para los conductores. Finalmente, medimos el número de veces que el algoritmo realiza su tarea exitosamente, ya que puede ocurrir que por colisiones, o pérdidas, o desconexión de la red, incluso circunstancias propias del algoritmo, éste no pueda cubrir el área de interés. Finalmente, cada proceso de difusión es considerado como un experimento. Por lo tanto, se realizaron 4000 experimentos por cada densidad de vehículos, lo que nos da un total de 32000 experimentos para cada algoritmo.

5.3. Resultados

Las simulaciones se realizaron con la configuración presentada en la Sección 4. En cada una de las medidas de desempeño se obtiene el promedio con respecto al número de vehículos en el área de interés.

5.3.1. Retardo promedio

Un retardo pequeño siempre es deseable para que los vehículos reciban información crítica lo más pronto posible. Así, los vehículos tendrán el mayor tiempo para reaccionar al evento detectado. Para estas simulaciones, obtuvimos el retardo de la siguiente manera. El nodo fuente, agrega una estampa de tiempo al mensaje que va a enviar y lo transmite. Todos los vehículos que se encuentren a una distancia mayor o igual a 1 km reportan el retardo, calculando la diferencia entre el tiempo actual del receptor y la estampa de tiempo incluida en el mensaje. En cada experimento, tomamos en cuenta únicamente el primer reporte que tengamos del retardo. En la Figura 5.2 presentamos el retardo promedio como función del número de nodos en el área de interés. Cabe destacar que *Fast-OB-VAN* tiene un desempeño mucho mejor que *OB-VAN* para todo el conjunto de número de nodos.

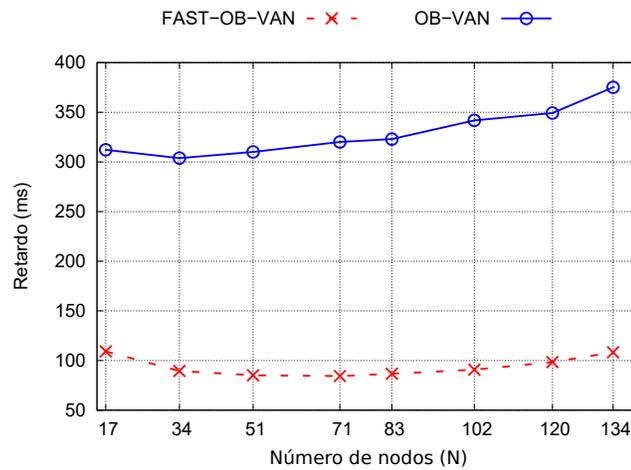


FIGURA 5.2: Retardo promedio como función del número de nodos.

5.3.2. Número de retransmisiones

Para este parámetro, tomamos en cuenta cada vez que se retransmite el mensaje hasta que dicho mensaje llegue a 1 km. Lo ideal es que el mensaje dé el mínimo de saltos necesarios para cubrir dicha distancia. En la Figura 5.3, presentamos el número promedio de veces que el mensaje es retransmitido. En este caso, *Fast-OB-VAN* realiza un número mayor de retransmisiones en comparación con *OB-VAN*. Esto es debido a que puede haber más de un vehículo con el bit más significativo en uno, por lo que puede haber más de un nodo que retransmita el mensaje. Podemos notar que, conforme se incrementa el número de vehículos, *Fast-OB-VAN* se acerca a *OB-VAN* e incluso termina por realizar menos retransmisiones. Esto es debido a que en *OB-VAN* el proceso de contienda, evaluado conforme al estándar IEEE 802.11p, puede seleccionar a más de un nodo retransmisor, mientras que en *Fast-OB-VAN* esto no ocurre, así al haber más vehículos éste tiene un mejor desempeño pues es más eficiente al momento de elegir al nodo retransmisor.

5.3.3. Porcentaje de veces que el algoritmo termina correctamente

Este parámetro es muy relevante y pocas veces estudiado, un algoritmo puede no cubrir el área de interés debido a diferentes circunstancias. Para este parámetro consideramos que el algoritmo terminó exitosamente si el mensaje es recibido por al menos un vehículo a una distancia mayor o igual a 1 km de distancia con respecto a la fuente de origen. Si ningún vehículo

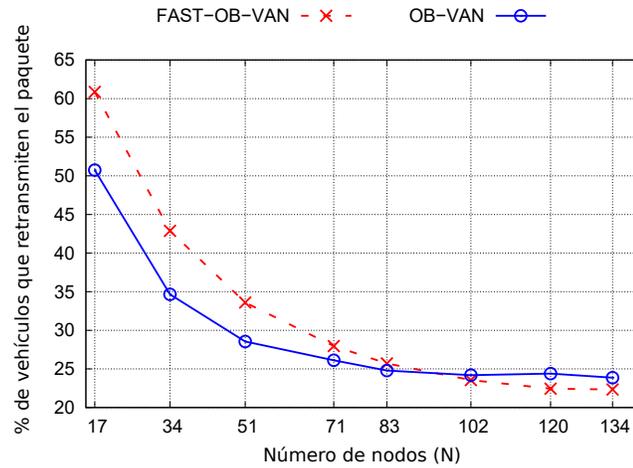


FIGURA 5.3: Porcentaje de vehículos que retransmiten el mensaje.

satisface esta condición, entonces decimos que el algoritmo no terminó exitosamente. Con esta información podemos determinar la confiabilidad del algoritmo. En la Figura 5.4, mostramos este parámetro. Como podemos ver, *OB-VAN* exhibe un pobre desempeño. Esto es debido a que *OB-VAN* debe transmitir todos los mensajes de señalización, y si estos mensajes se pierden entonces puede ocurrir que nunca se elija un nodo retransmisor. En tal caso, el algoritmo deja de retransmitir y no llega a su objetivo.

5.3.4. Porcentaje de vehículos que reciben el mensaje correctamente

Finalmente, evaluamos el número de vehículos que reciben exitosamente el mensaje, esto es primordial pues, al tratarse de mensajes de seguridad, es indispensable que todos los vehículos en el área de interés reciban el mensaje. En la Figure 5.5, mostramos esta evaluación. Nótese el comportamiento irregular que presenta *OB-VAN*, esto puede explicarse por la alta contienda

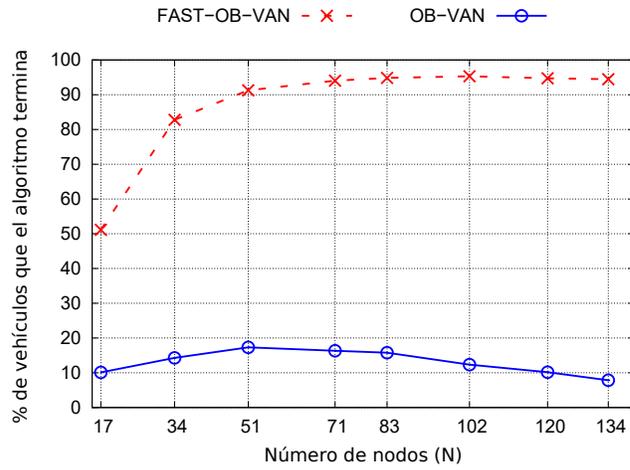


FIGURA 5.4: Porcentaje de veces que el algoritmo termina correctamente.

que se genera al estar intercambiando muchos mensajes de señalización. Además, recordemos que también están transmitiéndose los *beacons* lo que incrementa más la congestión de la red.

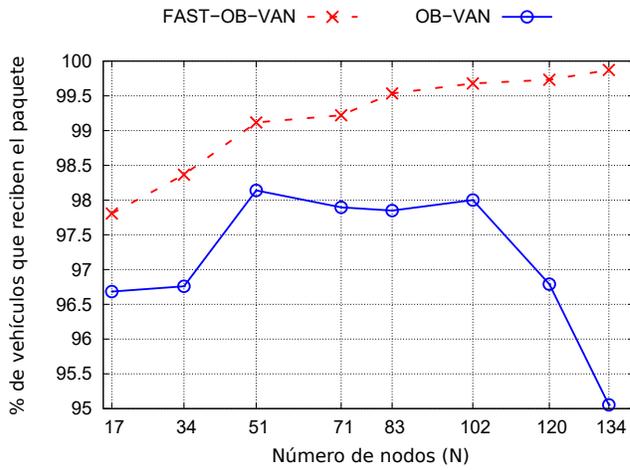


FIGURA 5.5: Porcentaje de vehículos que reciben el mensaje correctamente.

Capítulo 6

Preset Delay Broadcast

Con el fin de tener una vista general de cómo las diferentes técnicas difunden un mensaje, seleccionamos un conjunto de algoritmos que hacen uso de una o más técnicas de las descritas en la Sección 2.2.1. Implementamos la inundación simple, ya que este tipo de difusión representa el peor caso. También, implementamos un simple algoritmo basado en conteo, con un umbral de tres mensajes. Además, evaluamos el algoritmo *Bounding* [32], el cual utiliza una combinación de las técnicas basada en conteo y basada en distancia, aunque este algoritmo fue presentado originalmente para las *MANET* pensamos que puede aplicarse a las *VANET* por sus características. Para cubrir la técnica de conocimiento de vecinos, utilizamos el algoritmo *Non GPS Data Dissemination* [35], el cuál hace uso de el número de vecinos de cada vehículo para decidir cual de ellos va a retransmitir el mensaje e, idealmente, cubrir toda el área de interés. *GEDDAI* [33] nos da una panorámica de cómo se comportan los algoritmos basados en la posición geográfica. Para los algoritmos oportunistas, tomamos de la literatura el algoritmo *OppCast* [34],

además de comparar nuestra propuesta descrita en la sección anterior, *Fast-OB-VAN* [4]. Finalmente, comparamos un algoritmo nuevo que proponemos llamado *Preset Delay Broadcast (PDB)* [5] y que describimos en la siguiente sección.

6.1. Descripción del algoritmo *Preset Delay Broadcast*

Nuestra meta es diseñar un algoritmo que exhiba un bajo retardo en la difusión de mensajes, así como una alta confiabilidad. Entonces, proponemos *PDB*, el cual establece un retardo fijo para cada vehículo que intenta retransmitir el mensaje. Para el funcionamiento de *PDB*, consideramos el estándar IEEE 802.11p, tal como lo describimos en la Sección 2.1.7. Esto es debido a que queremos lograr una diseminación de la información eficiente apegados a las especificaciones del estándar. Asumimos que todos los vehículos conocen su posición de alguna manera, por ejemplo mediante un GPS, podemos asumir esto ya que los sistemas *WAVE* requieren el intercambio de dicha información. Para esto, todos los vehículos deben compartir su información de velocidad y movimiento mediante los *beacons*. Por lo tanto, cuando un vehículo necesite enviar un mensaje de emergencia, éste sabrá a qué distancia se encuentran sus vecinos. Con esta información, el vehículo fuente puede ordenar a sus vecinos desde el más cercano al más lejano, y así, decidir quiénes de sus vecinos son los mejores candidatos a retransmitir el mensaje. En esta evaluación elegimos a los diez vecinos más lejanos. Estos diez vecinos tendrán un tiempo de espera fijo que les indicará cuándo pueden retransmitir el mensaje. El vecino más lejano esperará 0.5 ms para

retransmitir el mensaje que reciba, el segundo más lejano esperará 1 ms, el tercero más lejano esperará 1.5 ms y así sucesivamente hasta el décimo vecino más lejano que deberá esperar 5 ms. Entonces, cuando un vehículo transmite un mensaje de emergencia, debe agregar a dicho mensaje la lista de los diez vecinos más lejanos. Adicionalmente, agregamos la distancia del vecino más lejano, esto para indicarles a posibles receptores qué distancia es la más lejana que tiene registrada el nodo fuente, y si un nodo más lejano a dicha distancia recibe el mensaje, entonces darle la oportunidad de retransmitir inmediatamente, pues es un mejor candidato. En la Figura 6.1, se muestra a detalle el diagrama de flujo de lo que un vehículo debe hacer al recibir un mensaje.

Como podemos ver en el diagrama de flujo, cuando un vehículo recibe un mensaje, debe revisar la lista de vecinos que viene incluida en dicho mensaje. Si el vehículo receptor encuentra su propio ID en la lista, debe esperar el tiempo que le corresponde de acuerdo a lo que describimos arriba. Si el receptor no encuentra su ID en la lista, entonces debe revisar la distancia del vehículo más lejano. Si la distancia que hay entre el receptor y emisor es menor que la distancia que viene en el mensaje, entonces el receptor espera un tiempo aleatorio entre 7 ms y 10 ms. Esto asegura que el mensaje se siga difundiendo en caso de que, por alguna razón, ningún vehículo de la lista retransmita el mensaje. Si la distancia entre emisor y receptor es mayor que la distancia incluida en el mensaje, entonces el receptor retransmitirá el mensaje inmediatamente. Esto permite que vehículos más lejanos que no han sido detectados por el vehículo emisor hagan la retransmisión más rápida.

Un ejemplo de los datos que se agregan al mensaje de seguridad se puede apreciar en la Figura 6.2. En este ejemplo, el vecino con ID 8 tiene un tiempo

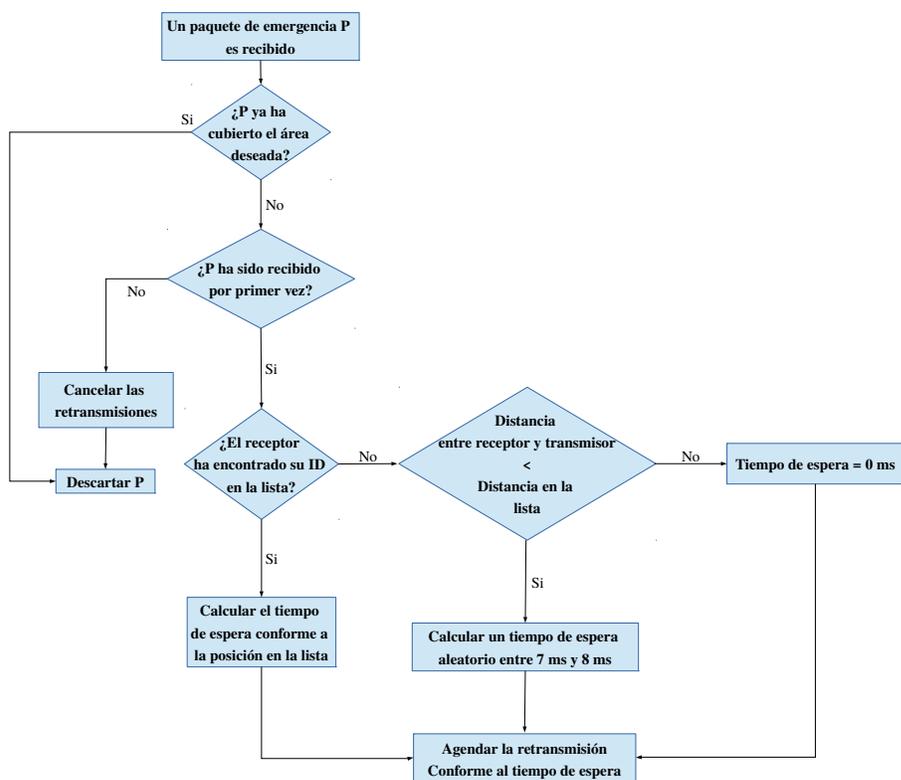


FIGURA 6.1: Diagrama de flujo de la recepción de mensajes en *PDB*.

de espera de 0.5 ms, el vecino con ID ID 2 tiene un tiempo de espera de 1 ms, el vecino con ID 3 tiene un tiempo de espera de 1.5 ms, y así sucesivamente. Para este ejemplo, un vehículo que no se encuentre en la lista pero que tenga una distancia hacia el emisor menor que 290 m tendrá un tiempo de espera aleatorio entre 7 ms y 10 ms. De manera similar, un vehículo que no se encuentre en la lista pero que tenga una distancia hacia el emisor mayor que 290 m, tendrá un tiempo de espera de 0 ms.

Cuando un vehículo retransmite un mensaje de emergencia, éste debe reemplazar la lista de vecinos con su propia lista de los diez vecinos más lejanos.

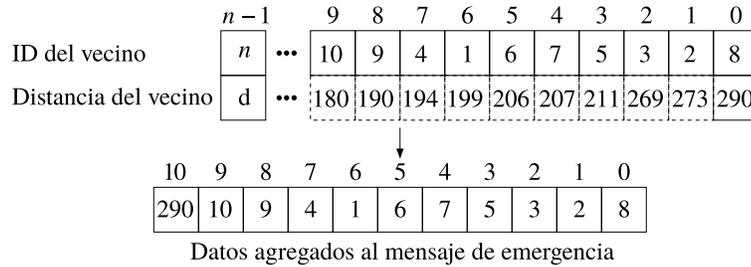


FIGURA 6.2: Ejemplo de los datos agregados al mensaje de seguridad.

Finalmente, cuando un vehículo recibe el mismo mensaje de emergencia por segunda vez, entonces debe cancelar la retransmisión e ignorar futuras recepciones del mismo mensaje. En el Algoritmo 2 damos el pseudocódigo de *PDB*.

El algoritmo consta de tres funciones. La primera de ellas es la función *GenerateWarningPacket* la cual se utiliza cuando el vehículo es quien va a comenzar un nuevo proceso de difusión. Para esto, se selecciona a los diez nodos más lejanos de su lista de vecinos y la distancia hacía el nodo más lejano, tal como se muestra en la Figura 6.2. Los agrega al mensaje y posteriormente inicia la difusión. La segunda función es la de *Receive*, lo primero que hace es revisar si el mensaje ya ha cubierto el área deseada. Si no es así, se revisa si el mensaje se ha recibido por primera vez. Si es así, se revisa si el receptor se encuentra en la lista de *ID* que vienen en el mensaje. Si sí se encontró en la lista, entonces se calcula el retardo tomando en cuenta la posición del *ID* en la lista. De lo contrario, se verifica la distancia incluida en el mensaje con la distancia entre el emisor generador del mensaje y el receptor. Si la distancia incluida en el mensaje es más grande, se calcula un retardo aleatorio entre siete y diez milisegundos. Por el contrario se establece un retardo de cero, es decir, se da acceso inmediato. Finalmente se agenda la

Algorithm 2 El algoritmo PDB

```

1: procedure GENERATEWARNINGPACKET
2:   MyIDs  $\leftarrow$  GetFarthestIDSorted(Neighbors)
3:   MyMaxDistance  $\leftarrow$  GetMaxDistance(Neighbors)
4:   AddIDsAndMaxDistance(MyIDs, MyMaxDistance, P)
5:   Broadcast(P)
6: procedure RECEIVE(Packet P)
7:   if P has not covered the desired area then
8:     if P is received for the first time then
9:       IDs, MaxDistance  $\leftarrow$  GetIDsAndDistance(P)
10:      PositionFound  $\leftarrow$  SearchMyID(IDs)
11:      RebroadcastFlag  $\leftarrow$  TRUE
12:      if PositionFound then
13:        Delay  $\leftarrow$  MilliSeconds( $\frac{\text{Position} + 1}{2}$ )
14:      else
15:        if MyDistToSource > MaxDistance then
16:          Delay  $\leftarrow$  MilliSeconds(0)
17:        else
18:          Delay  $\leftarrow$  MilliSeconds(Random(7, 10))
19:        Schedule(Delay, Rebroadcast, P)
20:      else
21:        RebroadcastFlag  $\leftarrow$  False
22:    else
23:      End the algorithm
24: procedure REBROADCAST(Packet P)
25:   if RebroadcastFlag = TRUE then
26:     MyIDs  $\leftarrow$  GetFarthestIDSorted(Neighbors)
27:     MyMaxDistance  $\leftarrow$  GetMaxDistance(Neighbors)
28:     ReplaceIDsAndMaxDistance(MyIDs, MyMaxDistance, P)
29:     Broadcast(P)
30:   else
31:     End the algorithm

```

función Rebroadcast con el retardo calculado. Ésta realiza la retransmisión del mensaje siempre y cuando la bandera de retransmisión esté en verdadero. Para realizar la retransmisión se reemplazan los *ID* más lejanos y la máxima distancia en el mensaje con las del receptor.

6.2. Escenarios de estudio

6.2.1. Eficiencia de los algoritmos

Para la primera campaña de simulaciones, evaluamos los algoritmos mencionados anteriormente bajo las condiciones del estándar. Aun sí algunos mecanismos fueron propuestos originalmente para trabajar con otra capa *MAC* o con otras condiciones diferentes a las de la familia de estándares IEEE 1609.X o IEEE 802.11p, nosotros implementamos todos los algoritmos de acuerdo a los estándares de la IEEE. De este modo, podemos analizar el desempeño de los diferentes algoritmos bajo las mismas condiciones. Con esta evaluación identificaremos las ventajas y desventajas de cada técnica evaluada. Entonces, el intercambio de mensajes en este escenario es como el mostrado en la Figura 6.3.

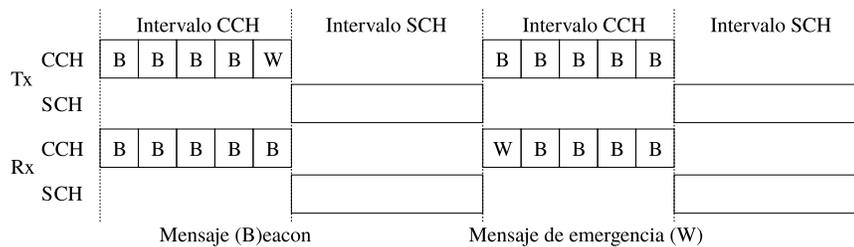


FIGURA 6.3: Ejemplo de los posibles mensajes para el escenario 1.

6.2.2. Interrupción de los *beacons*

Del anterior caso de estudio, podemos ver que los mensajes de seguridad y los *beacons* deben competir por ganar el acceso al medio. Dicha contienda puede incrementar el retardo de los mensajes de seguridad, pero también

pueden ocurrir colisiones, o terminales ocultas. Entonces, cuando un vehículo recibe un mensaje de seguridad, o necesita transmitir uno, ese vehículo detiene su generación de *beacons* para reducir la contienda por el medio y que tengan mejor condición de transmisión los mensajes de seguridad. En la Figura 6.4, mostramos un ejemplo de posible intercambio de mensajes para este escenario.

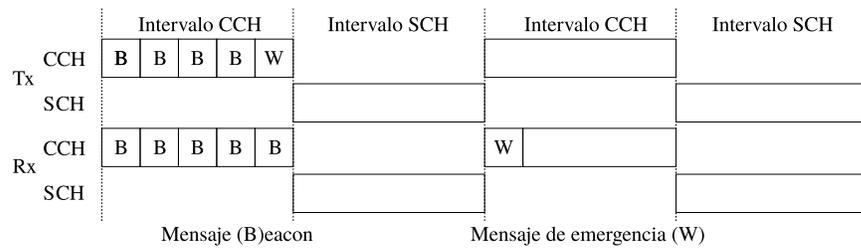


FIGURA 6.4: Ejemplo de los posibles mensajes para el escenario 2.

6.2.3. Acceso continuo al canal

Finalmente, evaluamos el escenario 2 con acceso continuo para el CCH con el fin de reducir el retardo agregado durante el intercambio de canales. Cada que el CCH cambia a uno de los SCH, los mensajes de emergencia deben esperar el tiempo que el SCH esté operando, y al regresar al CCH continúan su transmisión. Dicho retardo puede ocurrir más de una vez durante todo el proceso de diseminación del mensaje de emergencia, y el acceso continuo al CCH elimina este retardo. Un ejemplo del intercambio de mensajes para este escenario se muestra en la Figura 6.5.

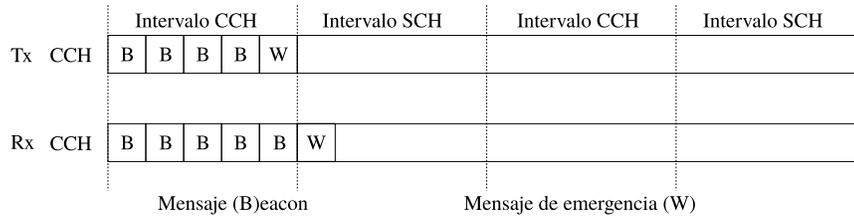


FIGURA 6.5: Ejemplo de los posibles mensajes para el escenario 3.

6.3. Resultados

Para estas simulaciones se utiliza la misma configuración de red y de movilidad descrita en la Sección 4. También se utilizaron las mismas medidas de desempeño descritas en la Sección 5.2. En este caso, se realizaron 4000 experimentos por cada densidad de vehículos, lo que nos da un total de 32000 experimentos. Y un total de 96000 experimentos considerando los tres casos de estudio para cada uno de los algoritmos.

6.3.1. Retardo promedio

En la Figura 6.6 presentamos el retardo promedio como función del número de nodos dentro del área de interés. Para cada experimento, medimos el retardo de la siguiente manera. La fuente agrega una estampa de tiempo al mensaje, entonces todos los vehículos que reciban el mensaje y se encuentren a una distancia mayor o igual a 1 km reportan el retardo calculando la diferencia entre el tiempo actual y el tiempo que viene en el mensaje. Aun sí más de un vehículo reporta el retardo, sólo tomamos en cuenta el primer reporte.

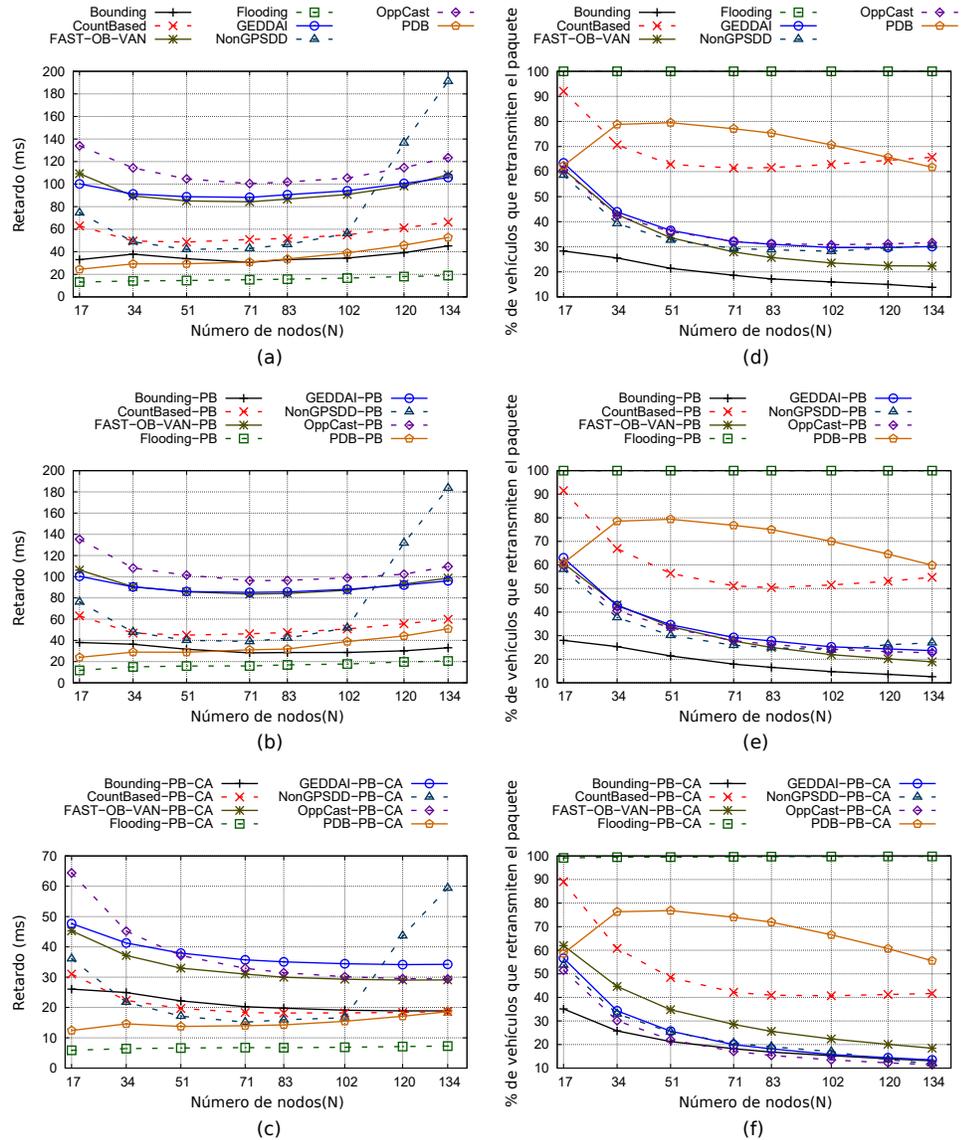


FIGURA 6.6: **Izquierda:** Retardo promedio como función del número de nodos en los escenarios uno (a), dos (b), y tres (c). **Derecha:** Porcentaje de vehículos que retransmiten el mensaje en los escenarios uno (d), dos (e), y tres (f).

Eficiencia de los algoritmos. Para el primer escenario de estudio, *Flooding* es el algoritmo que más rápido cubre el área de interés de 1 km. Esto es debido a que dicha difusión no tiene que lidiar con tiempos de espera para retransmitir los mensajes. Luego, *PDB* y *Bounding* exhiben retardos similares y cercanos a *Flooding*. Por un lado, ya que *PDB* tiene tiempos de espera fijos para retransmitir los mensajes, se puede tener más control en el retardo y obtener, por lo tanto, retardos pequeños. Por otro lado, *Bounding* permite que al menos tres de los vehículos más lejanos retransmitan el mensaje, logrando saltos largos para cubrir rápidamente el área deseada. Con un retardo ligeramente mayor, los algoritmos *Count-based* y *NonGPSDD* presentan un comportamiento similar. Sin embargo, el retardo para *NonGPSDD* se decrementa conforme la densidad de vehículos aumenta. Finalmente, los algoritmos que siguen en desempeño son *Fast-OB-VAN*, seguido de cerca por *GEDDAI* y *OppCast*.

Interrupción de los *beacons*. En el segundo escenario de evaluación se detienen los *beacons* al detectar un mensaje de emergencia. Existe un decremento en el retardo para todos los algoritmos, sin embargo, es muy pequeña la diferencia. Por lo tanto, es un poco difícil percibir una diferencia entre la gráfica de la Figura 6.6 (a) y la gráfica de la Figura 6.6 (b). Entonces, es claro que detener los *beacons* no representa una gran mejora en términos de retardo para cubrir el área deseada.

Acceso continuo al canal. En nuestro tercer caso de estudio, le permitimos a los vehículos tener acceso continuo al CCH. Así, podemos ver en la Figura 6.6 (c) que todos los algoritmos presentan una disminución en el retardo comparado con los escenarios previos. Dicho decremento en el retardo es debido a que los mensajes no se ven interrumpidos por el cambio de

canal. Por lo tanto, el mensaje se envía tan pronto como sea posible.

Entonces, si solo tomamos en cuenta el retardo, la mejor opción para difundir los mensajes sería *Flooding*, seguido de nuestra propuesta *PDB* y *Bounding*. En las evaluaciones siguientes podremos ver si dicho comportamiento se preserva.

6.3.2. Retransmisión de mensajes

Con el fin de medir este parámetro, medimos la cantidad de vehículos que retransmiten el mensaje. Consideramos que un vehículo retransmite el mensaje una vez que lo ha recibido exitosamente de la fuente y el algoritmo de difusión decide retransmitirlo. El porcentaje de retransmisiones se obtiene al dividir el total de vehículos que retransmitieron el mensaje y el total de vehículos que recibieron exitosamente el mensaje.

Eficiencia de los algoritmos. Podemos ver en la Figura 6.6 (arriba-derecha) que *Bounding* es el algoritmo que requiere una menor cantidad de retransmisiones. Después, *Fast-OB-VAN*, *GEDDAI*, *NonGPSDD*, y *Opp-Cast* muestran un desempeño similar. Para nuestra propuesta *PDB*, notamos que comienza con un comportamiento similar al de los algoritmos anteriores pero al incrementarse el número de nodos se incrementan también el número de retransmisiones. sin embargo, al seguir creciendo aún más el número de nodos, el porcentaje de retransmisiones comienza a reducirse. Esto puede explicarse por el tiempo de espera tan pequeño que se les asignó, puede ocurrir que no alcancen a recibir el segundo mensaje y entonces otros vehículos también lo retransmitan. Luego notamos que *Count-based* también toma un número considerable de retransmisiones, sin embargo es comprensible pues

el algoritmo debe esperar a recibir tres retransmisiones para cancelar la suya propia. Finalmente, *Flooding* presenta un 100 % de retransmisiones pues esa es la naturaleza de la difusión en la inundación simple.

Interrupción de los *beacons*. De manera similar a lo que sucede con el retardo, el detener los *beacons* no representa una gran diferencia en el desempeño de los algoritmos, así en la Figura 6.6 (d) y la Figura 6.6 (e) son similares. Por lo tanto, podemos concluir que el detener los *beacons* no representa una mejora en la reducción de retransmisiones.

Acceso continuo al canal. En nuestro tercer caso de estudio con el acceso continuo al *CCH* podemos apreciar en la Figura 6.6 (f) un ligero decremento en el porcentaje de retransmisiones. Esto lo podemos explicar por el hecho de que el proceso de difusión no es interrumpido y no hay necesidad de reiniciar las retransmisiones.

6.3.3. Porcentaje de veces que el algoritmo termina correctamente

Consideramos que el algoritmo termina correctamente si el mensaje llega exitosamente a al menos un vehículo a una distancia de al menos 1 km de distancia de el vehículo que generó el mensaje. Si ningún vehículo cumple con esta condición entonces decimos que el algoritmo no terminó correctamente. Así, podemos decir qué tan confiable es el algoritmo.

Eficiencia de los algoritmos. En la Figura 6.7 (a) graficamos el porcentaje de veces que el algoritmo termina correctamente. Cabe destacar que *Bounding* presenta el peor desempeño en este parámetro de evaluación. Por

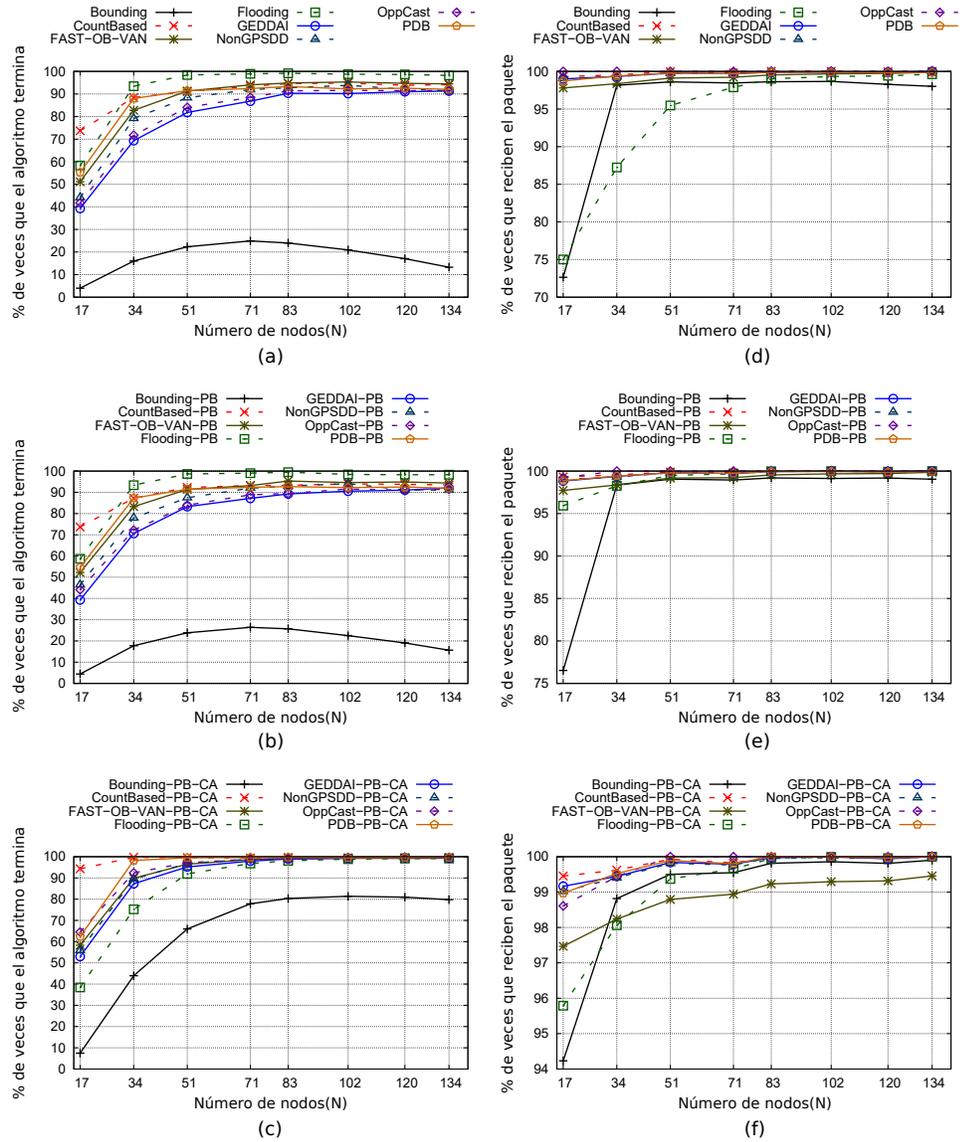


FIGURA 6.7: **Izquierda:** Porcentaje de veces que el algoritmo terminó correctamente en los escenarios uno (a), dos (b), y tres (c). **Derecha:** Porcentaje de vehículos que recibieron el mensaje correctamente en los escenarios uno (d), dos (e), y tres (f).

lo tanto, aun cuando en los parámetros evaluados anteriormente *Bounding* presenta un buen desempeño, en este caso vemos que únicamente termina correctamente el 25 % de las veces en el mejor caso. Este desempeño tan pobre se puede explicar ya que *Bounding* sólo permite que los vehículos que se encuentren en cierta área contiendan por retransmitir el mensaje, el resto de los vehículos nunca intenta hacer la retransmisión. Por lo tanto, si no hay vehículos en el área donde se les permite retransmitir, o debido a colisiones o terminales ocultas no reciben el mensaje dichos vehículos, entonces el algoritmo no puede continuar la retransmisión y no cubre el área de 1 km de distancia. El resto de los algoritmos muestran un comportamiento similar cuando la densidad de vehículos se incrementa. Mientras que con pocos vehículos, los algoritmos presentan problemas para tener un buen desempeño. Es importante notar que en este trabajo no tratamos la desconexión de la red. Sin embargo, cada algoritmo puede fácilmente implementar el procedimiento *store-carry-and-forward* como el detallado en *OppCast* [34].

Interrupción de los *beacons*. De manera similar que en los casos anteriores, al comparar la Figura 6.7 (a) y la Figura 6.7 (b) claramente vemos que detener los *beacons* no contribuye significativamente a mejorar el porcentaje de veces que terminan correctamente los algoritmos.

Acceso continuo al canal. En la Figura 6.7 (c) en la mayoría de los algoritmos, se muestra un ligero incremento en el desempeño del porcentaje de veces que el algoritmo termina correctamente. Sin embargo, *Bounding* tiene un drástico incremento en su confiabilidad. Esto implica, que el intercambio de canales afecta al desempeño de *Bounding*. Aún así, *Bounding* sigue teniendo el peor desempeño comparado con el resto de los algoritmos.

6.3.4. Porcentaje de vehículos que reciben el mensaje

El último parámetro que consideramos, es el porcentaje de vehículos que reciben correctamente el mensaje. Esto lo calculamos al dividir el número de vehículos que recibieron correctamente el mensaje y el número total de vehículos que se encuentran en el área de interés.

Eficiencia de los algoritmos. El primer caso de estudio se encuentra graficado en la Figura 6.7 (d). Aun cuando *Flooding* presenta un buen desempeño en términos de retardo y de confiabilidad, éste tiene un bajo porcentaje de recepción cuando la densidad de vehículos es baja. *Bounding* muestra un comportamiento similar. El resto de los algoritmos muestran un excelente desempeño, por encima del 97 %.

Interrupción de los *beacons*. A diferencia de los escenarios de estudio anteriores, en la Figura 6.7 (e) muestra un incremento para el caso de *Flooding*. El resto de los algoritmos sólo mejoran muy poco.

Acceso continuo al canal. Podemos ver en la Figura 6.7 (f) un incremento en el desempeño de *Bounding*. Ya con este escenario de estudio todos los algoritmos están por encima del 94 % de vehículos que recibieron correctamente el mensaje.

Capítulo 7

Efecto del entorno vehicular en la difusión de información en VANET

Cuando se realiza una evaluación sobre una *VANET*, debe usarse un escenario vehicular para hacerlo. Comúnmente, en la literatura, encontramos evaluaciones sobre una autopista, áreas urbanas, o mapas basados en trazas de tráfico real. Como ejemplo de evaluaciones sobre autopistas tenemos trabajos como el de Lusheng Miao [48] et al., los autores hacen una evaluación de la capa *MAC* de IEEE 802.11p, y concluyen que, extendiendo el intervalo del *CCH*, el desempeño de la *MAC* puede mejorar. En [49] proponen usar *self-organizing time division multiple access (STDMA)* en lugar del implementado en el estándar *carrier sense multiple access (CSMA)*, para mejorar la confiabilidad de la capa *MAC*. Un análisis de diferentes protocolos, así

como una propuesta adaptable para mejorar el ancho de banda es propuesto por Estrella Garcia-Lozano [50] et al. Sin embargo, sólo analizan protocolos que no dependen del conocimiento de vecinos. Niloofar Toorchi [51] et al. proponen un modelo de Markov, basado en la ventana de contienda, con el que obtienen diferentes medidas de desempeño para hacer más eficiente el proceso de difusión. En [52], encontramos una propuesta de un algoritmo para brindar calidad de servicio *QoS* sobre una arquitectura híbrida entre *VANET* y una red *Long Term Evolution Advanced (LTE Advanced)*. También podemos encontrar en la literatura evaluaciones sobre áreas urbanas como la presentada por Yuanyuan Zeng [53] et al. donde un esquema candelarizado para encaminamiento direccional es propuesto. El propósito es optimizar el consumo de energía tomando en cuenta el buffer, el retardo y la congestión utilizando Nash Q-learning. En [54], presentan una arquitectura de red heterogénea *cellular-VANET* para realizar una eficiente disseminación de información, con el fin de maximizar la tasa de transición. S. Sai [55] et al. realizan una comparación entre las bandas de $700MHz$ y $5.9GHz$, concluyen que se requieren mejoras en la banda de los $5.9GHz$ para lidiar con la comunicación sin línea de vista (*Non-Line-of-Sight, NLOS*). Un esquema de encaminamiento donde la posición y dirección de movimiento se combinan con el mecanismo *Store-Carry-Forward* con el fin de reducir los mensajes encaminados es presentado por Yasuharu Ohta [56] et al. En [57], proponen un protocolo de difusión probabilístico que toma en cuenta la densidad de vecinos para que cada vehículo ajuste su probabilidad de retransmisión. En [58] se presenta un protocolo de encaminamiento que analiza la ruta subóptima en cada intersección con el fin de reducir el retardo de extremo a extremo y alcanzar una alta tasa de entrega. M. Bakhouya [59] et al. proponen un protocolo para difundir información, el protocolo decide si retransmite o no el

mensaje de acuerdo a la cantidad de veces que el mensaje ha sido recibido en un intervalo de tiempo. Finalmente, P. S. Nithya Darisini [60] y N. Santhiya Kumari dan una revisión bibliográfica sobre protocolos de encaminamiento para áreas urbanas. También existen evaluaciones que consideran ambos escenarios, sin embargo no se hace énfasis en las diferencias, si existen, entre éstos. Francisco J. Ros [61] et al. proponen un algoritmo que alcanza una gran confiabilidad, además no varía su operación por ningún parámetro o umbral. Michael Slavik [62] et al. analizan la tasa de generación de *beacons* con el fin de mejorar el desempeño de los algoritmos de difusión, encuentran que la tasa de generación de *beacons* debe ser ajustada para cada algoritmo.

Como podemos observar, las propuestas encontradas en la literatura, no nos ofrecen un análisis sobre la diferencia de evaluar en uno u otro escenario. En la siguiente sección, proponemos un escenario de evaluación que contempla un área urbana y una autopista, así como la unión de ambos.

7.1. Escenario propuesto

Con el fin de verificar el comportamiento de los algoritmos de difusión de información para mensajes de seguridad, proponemos un escenario que consta de 8 km de autopista, un área urbana de 4 km², y unidos por un camino de 5.5 km como se muestra en la Figura 7.1. Tenemos un total de tres fuentes que transmiten mensajes de seguridad. Con esto, podemos observar el comportamiento de los algoritmos en la autopista, que es la fuente $S0$, el comportamiento en el área urbana, que es la fuente $S2$, y el comportamiento en la unión de autopista y área urbana, que es la fuente $S1$.

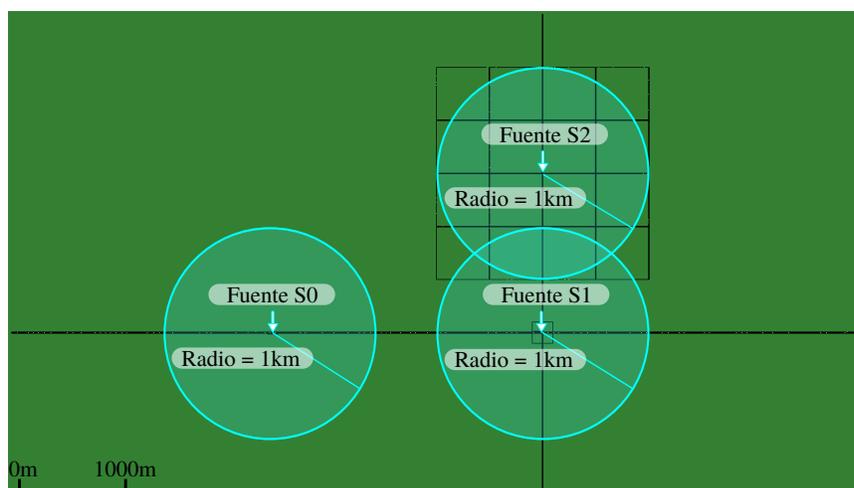


FIGURA 7.1: Escenario propuesto.

En la figura podemos observar el área que queremos cubrir con los algoritmos de difusión, 1 km en cada dirección y para cada fuente emisora de mensajes de seguridad. Cada vía tiene sus propios límites de velocidad, por lo que los vehículos viajan más rápido en la autopista que en el área urbana. Además, se usaron diferentes densidades de vehículos para observar el comportamiento de los algoritmos con cargas de vehículos desde ligeras hasta altas.

7.2. Parámetros del sistema

Utilizamos *SUMO* para generar el escenario descrito anteriormente, con vehículos moviéndose en ambas direcciones. Cuando una fuente genera un mensaje de emergencia este debe ser retransmitido hasta cubrir 1 km en todas las direcciones posibles. En la Tabla 7.1, presentamos los parámetros que describen la movilidad de los vehículos. Consideramos un total de siete

trazas de movilidad, con diferentes densidades de vehículos. Por lo tanto, para la simulación de la red tenemos el conjunto $\{25, 28, 33, 38, 46, 59, 81\}$ que representa el promedio de vehículos en el área de interés para la fuente $S0$. El conjunto $\{25, 28, 33, 38, 46, 59, 81\}$ que representa el promedio de vehículos en el área de interés para la fuente $S1$. Finalmente el conjunto $\{58, 64, 73, 83, 97, 117, 145\}$ representa el promedio de vehículos en el área de interés dentro del área de la fuente $S2$.

TABLA 7.1: Configuración de los vehículos.

Parámetro	Valor
Aceleración	4 m/s ²
Desaceleración	5.0 m/s ²
minGap	0.1 m
Carril inicial	Random
Velocidad inicial	Random
Velocidad máxima	Depende del camino
Modelo de movilidad	SUMOKrauß

Para evaluar los escenarios tomamos los algoritmos con los mejores resultados del capítulo anterior, *Flooding*, *Count-Based*, y *PDB*. De igual forma, al notar que los algoritmos ofrecen un mejor desempeño con el acceso continuo para el *CCH*, evaluamos los algoritmos bajo estas circunstancias. Para la red utilizamos el simulador *NS-3* como lo describimos en la Sección 4

7.3. Resultados

Para poder identificar las posibles diferencias entre distintos escenarios, obtenemos las medidas de desempeño descritas en la Sección 5.2. De la campaña de simulaciones dichas medidas son obtenidas para cada fuente generadora

de mensajes de emergencia. Para cada algoritmo, se realizaron 4000 experimentos por cada densidad de vehículos, lo que nos da un total de 32000 experimentos. Y un total de 96000 experimentos considerando los tres fuentes generadoras de mensajes.

7.3.1. Retardo promedio

El retardo lo calculamos de la misma forma que en las evaluaciones anteriores. Para la fuente $S0$, el retardo promedio se encuentra en la Figura 7.2(a). Como podemos ver, *Flooding* tiene el retardo más pequeño. *PDB* es más rápido cuando el tráfico está menos congestionado. El retardo crece conforme aumenta la densidad de los vehículos. Sin embargo no es tan rápido dicho crecimiento. *CountBased* presenta un mayor retardo cuando hay pocos vehículos, sin embargo se decreta rápidamente conforme hay más vehículos en la autopista.

En la Figura 7.2(b), podemos observar el retardo promedio para la fuente $S1$. Podemos apreciar un comportamiento similar al visto para la fuente $S0$, pero en diferentes magnitudes. Notamos un incremento en el retardo, por lo tanto, los algoritmos son más lentos en la unión entre autopista y área urbana que únicamente en la autopista.

Finalmente, en la Figura 7.2(c) presentamos el retardo promedio para la fuente $S2$. De nueva cuenta observamos un comportamiento similar al de los casos anteriores, es decir para las fuentes $S0$ y $S1$. Sin embargo, vemos que *PDB* crece ligeramente más rápido conforme se incrementa la densidad de vehículos.

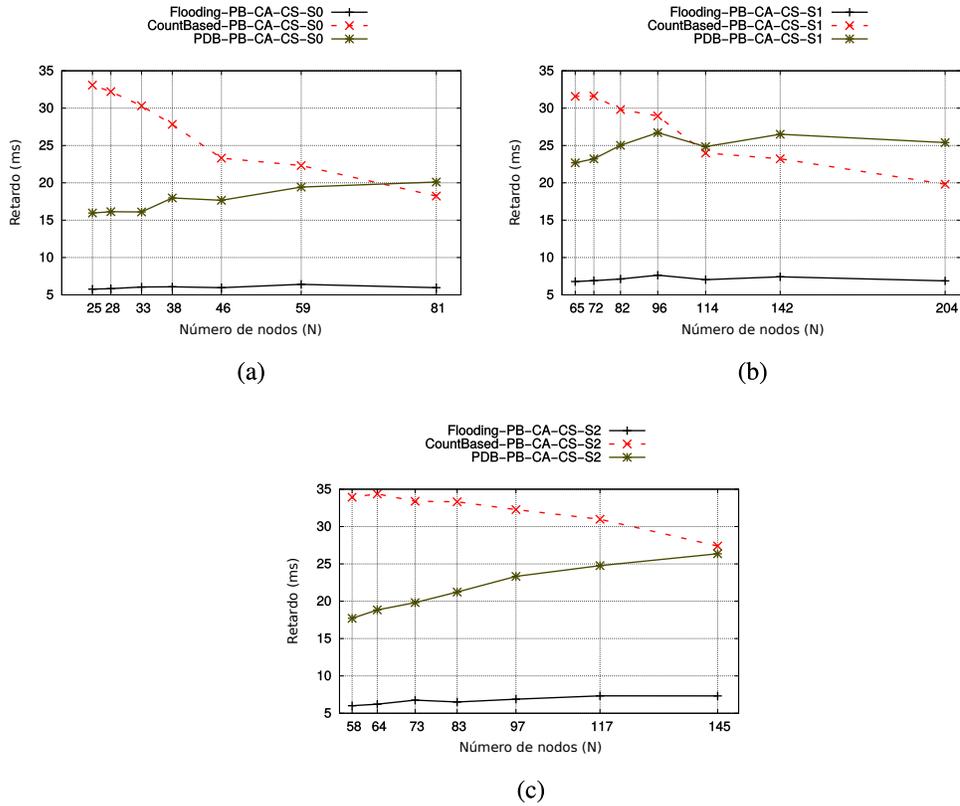


FIGURA 7.2: Retardo promedio para las fuentes (a) S_0 , (b) S_1 y (c) S_2 .

7.3.2. Retransmisión de mensajes

En la Figura 7.3(a), presentamos el porcentaje de retransmisiones que realizan los algoritmos para la fuente S_0 . *Flooding* retransmite el 100% de los mensajes, debido a la naturaleza del algoritmo. *Count-Based* realiza muchas retransmisiones con densidades bajas de vehículos, sin embargo se decremantan conforme el número de vehículos aumenta. Finalmente, *PDB* tiene un comportamiento similar al de *Count-Based*.

En la Figura 7.3(b), observamos el porcentaje de retransmisiones para la

fuelle $S1$. Como observamos en el parámetro anterior, hay comportamientos similares entre la fuente $S0$ y $S1$. Sin embargo, el porcentaje de retransmisión se decrementa más lentamente para la fuente $S1$.

El resultado para la fuente $S2$ es presentado en la Figura 7.3(c), donde podemos observar una ligera variación en el porcentaje de retransmisiones, sin embargo se preserva la misma tendencia que en las fuentes $S0$ y $S1$.

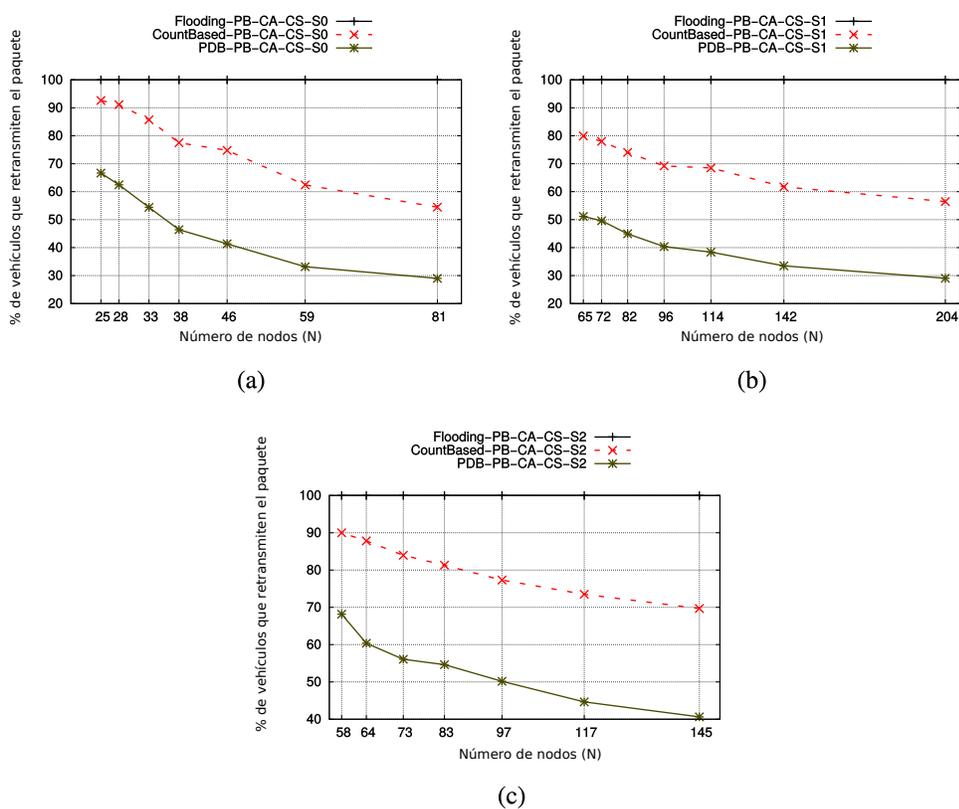


FIGURA 7.3: Porcentaje de retransmisiones para las fuentes (a) $S0$, (b) $S1$ y (c) $S2$.

7.3.3. Porcentaje de veces que el algoritmo terminó correctamente

En la Figura 7.4(a), observamos el porcentaje de veces que los algoritmos terminaron correctamente para la fuente *S0*. Podemos apreciar un comportamiento cercano entre los algoritmos, exhiben un desempeño pobre cuando hay pocos vehículos, esto debido a la desconexión de la red. Para la fuente *S1*, en la Figura 7.4(b) notamos las mismas circunstancias que en las evaluaciones previas, el mismo comportamiento, pero con una ligera variación en el porcentaje de veces que el algoritmo termina correctamente.

A diferencia de los resultados previos, para la fuente *S2* en la Figura 7.4(c) notamos un comportamiento diferente en los algoritmos, esta vez observamos un comportamiento más lineal que en las fuentes *S0* y *S1*. Cabe mencionar que el porcentaje de veces que el algoritmo termina correctamente es diferente en la autopista, o en la unión entre la autopista y el área urbana que únicamente en el área urbana.

7.3.4. Porcentaje de vehículos que reciben el mensaje

En la Figura 7.5(a), presentamos el porcentaje de vehículos que reciben el mensaje correctamente para la fuente *S0*. Observamos un comportamiento similar entre *CountBased* y *PDB*, así como un desempeño un poco más pobre para *Flooding*. Para la fuente *S1*, en la Figura 7.5(b) observamos un ligero cambio en el comportamiento de los algoritmos, sin embargo todos los algoritmos tienen un pequeño decremento en el desempeño.

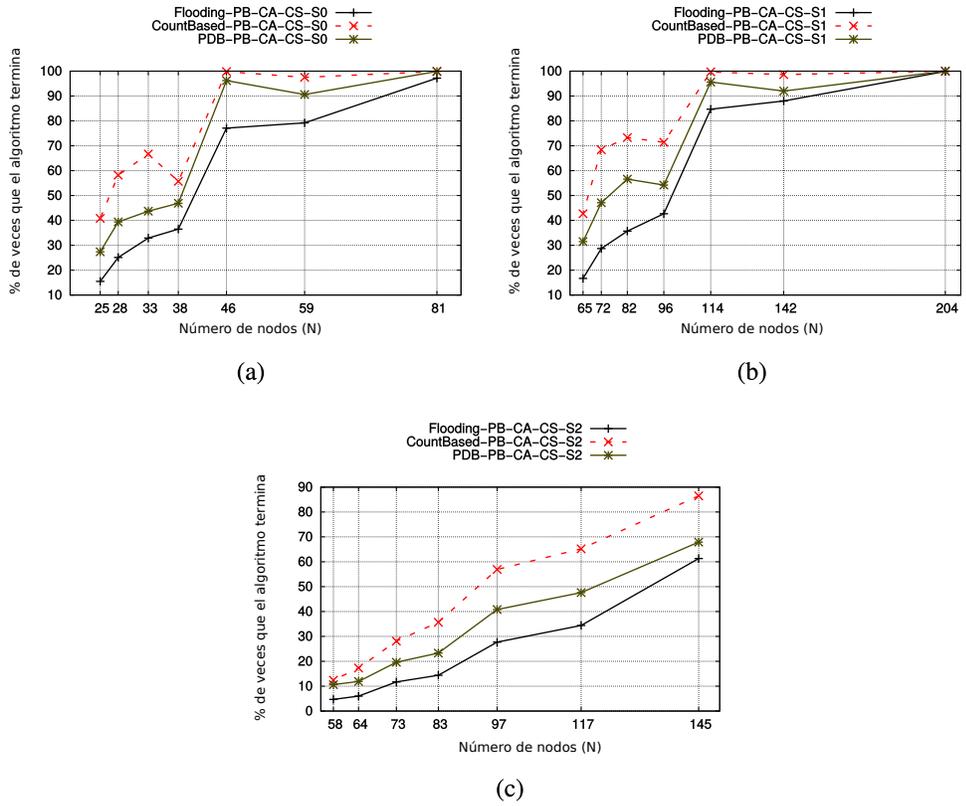


FIGURA 7.4: Porcentaje de veces que los algoritmos terminan correctamente para las fuentes (a) S_0 , (b) S_1 y (c) S_2 .

Finalmente, para la fuente S_2 en la Figura 7.5(c), notamos de nueva cuenta un cambio en el comportamiento de los algoritmos con respecto a lo observado en las fuentes S_0 y S_1 . Por lo tanto, para esta evaluación, podemos observar diferentes desempeños entre cada escenario.

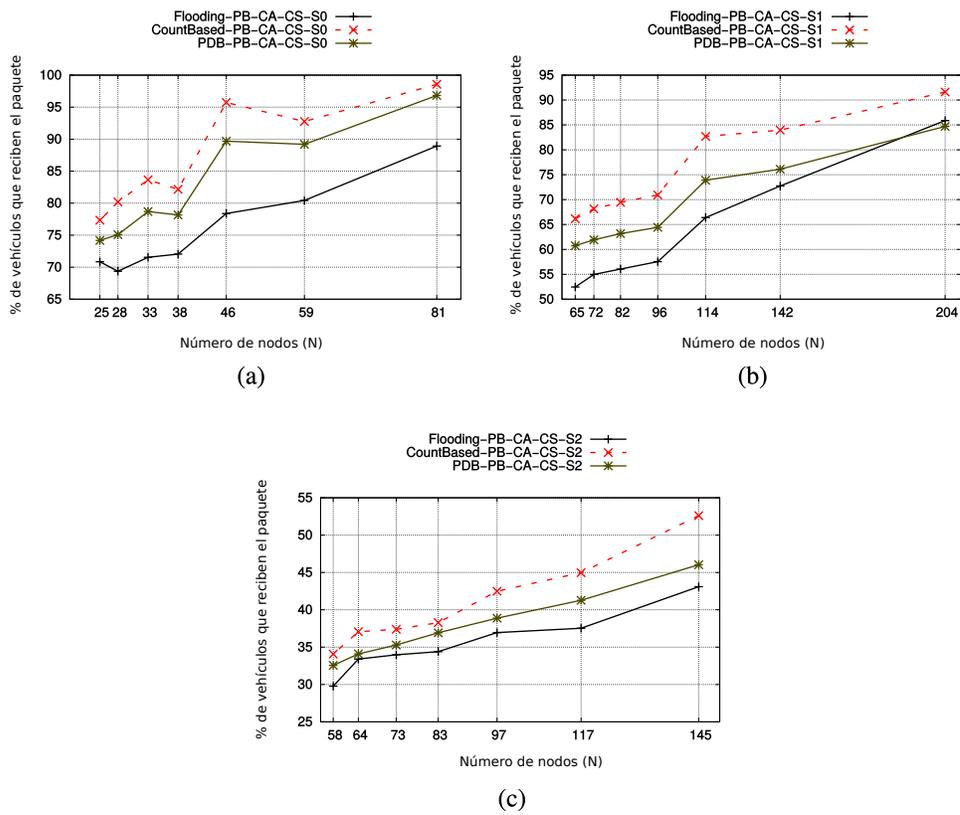


FIGURA 7.5: Porcentaje de vehículos que reciben el mensaje exitosamente para las fuentes (a) S_0 , (b) S_1 y (c) S_2 .

Capítulo 8

Conclusiones y perspectivas

En este trabajo realizamos un profundo análisis de los mecanismos de difusión de información crítica. En primera instancia, propusimos una mejora del algoritmo *OB-VAN* para hacer más eficiente la difusión de información en *VANET*. Ya que las aplicaciones de las *VANET* demandan un bajo retardo, este parámetro es fundamental en la evaluación de los algoritmos de difusión. Hemos mostrado que eligiendo cuidadosamente lo que se transmite en los intervalos de transmisión del algoritmo, podemos obtener una disminución en el retardo. Por lo tanto, nuestra propuesta *Fast-OB-VAN* presenta un mejor desempeño comparado con su contraparte *OB-VAN*.

Adicionalmente, el número de veces que *Fast-OB-VAN* termina correctamente es siete veces mejor que *OB-VAN*. Esto se debe principalmente a que la contienda por el medio es mayor en *OB-VAN* que en *Fast-OB-VAN*. Finalmente, aun si el porcentaje de retransmisiones es ligeramente mayor en

Fast-OB-VAN, la ganancia obtenida en términos del retardo es altamente considerable.

Nuestro siguiente aporte fue realizar un extenso análisis de las técnicas de difusión de información en *VANET*. Además, con el fin de alcanzar un bajo retardo y una alta confiabilidad para difundir mensajes de seguridad, propusimos un algoritmo que preestablece el tiempo de espera para retransmitir los mensajes. Mostramos que, haciendo esto, podemos reducir significativamente el retardo para cubrir un área de interés. Más aún, incluso si *PDB* necesita un porcentaje mayor de retransmisiones que otros algoritmos, éstas se reducen al incrementarse la densidad de vehículos. Además, *PDB* ofrece una alta tasa de recepción y una gran confiabilidad para cubrir el área de interés.

Los algoritmos evaluados para representar las diferentes técnicas de difusión de información nos muestran que *Flooding* ofrece la difusión más rápida para cubrir un área. Sin embargo, sufre de *broadcast storm*, ya que todos los vehículos retransmiten los mensajes, lo cual reduce la tasa de recepción debido a colisiones y terminales ocultas. *Bounding*, exhibe un bajo retardo y un bajo porcentaje de retransmisiones. Sin embargo, no es muy confiable ya que pocas veces logra cubrir el área de interés. Esta evaluación nos permite darnos cuenta que la técnica basada en distancia, le permite al mensaje dar saltos más largos por lo que la difusión es rápida, y por consecuencia el número de retransmisiones es bajo. Sin embargo al ver que no es muy confiable, en términos de la cantidad de veces que el algoritmo termina correctamente, podemos darnos cuenta que la técnica de distancia, al no contemplar nodos cercanos, puede no encontrar candidatos a retransmitir en el área definida y por lo tanto no realizar la difusión del mensaje. *NonGPSDD* ofrece la

ventaja de no requerir un *GPS* para operar. El algoritmo muestra un buen desempeño en general, sin embargo el retardo se incrementa rápidamente conforme la densidad de vehículos aumenta. El algoritmo *GEDDAI* junto con *Fast-OB-VAN* y *OppCast* presentan un buen desempeño en la mayoría de los parámetros evaluados. Desafortunadamente presentan un alto retardo para cubrir el área de interés, lo cual consideramos vital para los mensajes de emergencia. De aquí notamos que las técnicas que utilizan los algoritmos anteriores presentan las mismas ventajas y desventajas, desafortunadamente la principal desventaja es el tiempo que les toma cubrir el área de interés, parámetro de vital importancia para el tipo de difusión estudiado en este trabajo. Finalmente, *Count-Based* y *PDB* muestran desempeños similares, una de las diferencias entre ambos es que *PDB* presenta un menor retardo. Aunque *PDB* hace más retransmisiones que *Count-Based*, notamos que éste último incrementa la cantidad de retransmisiones al incrementarse el número de vehículos. En contraste, *PDB* tiende a decrementar el número de retransmisiones al incrementarse la densidad de vehículos. Podemos concluir que, la decisión de utilizar *PDB* o *Count-Based* depende del compromiso que se quiera tener entre la rapidez en la difusión del mensaje y la cantidad de retransmisiones que se este dispuesto a realizar para no congestionar el medio. También concluimos que se puede utilizar el algoritmo que mejor desempeño tenga de acuerdo a las características de la red. Los vehículos podrían tener implementados más de un algoritmo de difusión, y dependiendo de la densidad de vehículos en la vía, decidir cual de los algoritmos utilizar.

Un resultado importante a resaltar, es que el hecho de interrumpir los *beacons* no representa una mejora significativa en el desempeño de los algoritmos. En contraste, el permitir el acceso continuo al canal sí representa un gran

beneficio en todos los parámetros, por lo tanto, utilizar antenas separadas para el *CCH* y los *SCH* sería una buena opción para mejorar el desempeño de la difusión de información de mensajes de seguridad.

De las últimas evaluaciones, concluimos que el retardo y el porcentaje de retransmisiones no presentan un cambio tan grande entre las distintas áreas. Sin embargo, la tasa de recepción y el porcentaje de veces que el algoritmo termina correctamente sí presentan una variación un poco más considerable. Por lo tanto, es importante que al realizar evaluaciones sobre redes vehiculares, se considere la zona en la que se hace con el fin de presentar resultados más precisos. Los vehículos podrían elegir el algoritmo a utilizar dependiendo de la zona en la que se encuentren. Ya que como observamos en los resultados, principalmente el retardo presenta un mayor cambio dependiendo de la zona en la que se difunde el mensaje. Para ésto, sería necesario que los vehículos puedan identificar en que zona se encuentran para así poder utilizar el algoritmo que mejores resultados presente para dicha zona, tomando en cuenta también la densidad de vehículos.

Finalmente, es interesante analizar como se ve afectado el desempeño de la difusión de información cuando más de una aplicación esta en operación, pues como vimos en la Tabla 2.1 hay más de una aplicación pensada para mejorar la movilidad vehicular. Sería importante establecer cuál es el máximo de aplicaciones que puede soportar el *CCH* para seguir manteniendo los requerimientos de las aplicaciones, y poder determinar si es necesario el uso de más de un canal para dichas aplicaciones.

Referencias

- [1] *IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments*, 2010. DOI: 10.1109/ieeestd.2010.5514475.
- [2] L. Wei, X. Xiao, Y. Chen, M. Xu y H. Fan, “Power-control-based broadcast scheme for emergency messages in VANETs”, en *2011 11th International Symposium on Communications & Information Technologies (ISCIT)*, IEEE, 2011. DOI: 10.1109/iscit.2011.6089748. dirección: <https://doi.org/10.1109/iscit.2011.6089748>.
- [3] *DOT HS 811 492A Vehicle Safety Communications – Applications (VSC-A) Final Report*, 2011.
- [4] S. Gonzalez y V. Ramos, “Fast-OB-VAN: A Fast Opportunistic Broadcast Protocol for VANETs”, en *2015 9th International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies*, Cambridge, United Kingdom: Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2015, págs. 114-119. DOI: 10.1109/ngmast.2015.52. dirección: <http://dx.doi.org/10.1109/NGMAST.2015.52>.

-
- [5] —, “Preset delay broadcast: a protocol for fast information dissemination in vehicular ad hoc networks (VANETs)”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2016, n.º 1, 2016. DOI: 10.1186/s13638-016-0614-4. dirección: <https://doi.org/10.1186/s13638-016-0614-4>.
- [6] *IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)–Multi-channel Operation*, 2011. DOI: 10.1109/ieeestd.2011.5712769.
- [7] *700 MHz Band Intelligent Transport Systems, ARIB STD-T109*, 2012.
- [8] *Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture*, 2010.
- [9] *ITS Co-operative systems ISO/TC 204/WG 18*, 2010.
- [10] C. F. Mecklenbrauker, A. F. Molisch, J. Karedal, F. Tufvesson, A. Paier, L. Bernado, T. Zemen, O. Klemp y N. Czink, “Vehicular Channel Characterization and Its Implications for Wireless System Design and Performance”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, n.º 7, págs. 1189-1212, 2011. DOI: 10.1109/jproc.2010.2101990. dirección: <https://doi.org/10.1109/jproc.2010.2101990>.
- [11] I. Sen y D. Matolak, “Vehicle-Vehicle Channel Models for the 5-GHz Band”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 9, n.º 2, págs. 235-245, 2008. DOI: 10.1109/tits.2008.922881. dirección: <https://doi.org/10.1109/tits.2008.922881>.
- [12] L. Reichardt, C. Sturm y T. Zwick, “Performance evaluation of SISO, SIMO and MIMO antenna systems for car-to-car communications in urban environments”, en *2009 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications, (ITST)*, IEEE, 2009.

- DOI: 10.1109/itst.2009.5399385. dirección: <https://doi.org/10.1109/itst.2009.5399385>.
- [13] H. Asplund, A. Glazunov, A. Molisch, K. Pedersen y M. Steinbauer, “The COST 259 Directional Channel Model-Part II: Macrocells”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, n.º 12, págs. 3434-3450, 2006. DOI: 10.1109/twc.2006.256967. dirección: <https://doi.org/10.1109/twc.2006.256967>.
- [14] L. Correia, “COST 273 - towards mobile broadband multimedia networks”, en *Twelfth International Conference on Antennas and Propagation (ICAP 2003)*, IEE, 2003. DOI: 10.1049/cp:20030139. dirección: <https://doi.org/10.1049/cp:20030139>.
- [15] G. Calcev, D. Chizhik, B. Goransson, S. Howard, H. Huang, A. Kogiantis, A. F. Molisch, A. L. Moustakas, D. Reed y H. Xu, “A Wideband Spatial Channel Model for System-Wide Simulations”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, n.º 2, págs. 389-403, 2007. DOI: 10.1109/tvt.2007.891463. dirección: <https://doi.org/10.1109/tvt.2007.891463>.
- [16] P. Kyosti, J. Meinila, L. Hentila, X. Zhao, T. Jamsa, C. Schneider, M. Narandzic, M. Milojevic, A. Hong, J. Ylitalo, V. M. Holappa, M. Alatossava, R. Bultitude, Y. de Jong y T. Rautiainen, “WINNER II Channel Models”, Version 1.1, inf. téc., 2008.
- [17] J. Kunisch y J. Pamp, “Wideband Car-to-Car Radio Channel Measurements and Model at 5.9 GHz”, en *2008 IEEE 68th Vehicular Technology Conference*, IEEE, 2008. DOI: 10.1109/vetecf.2008.64. dirección: <https://doi.org/10.1109/vetecf.2008.64>.

- [18] A. Paier, L. Bernado, J. Karedal, O. Klemp y A. Kwoczek, “Overview of Vehicle-to-Vehicle Radio Channel Measurements for Collision Avoidance Applications”, en *2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference*, IEEE, 2010. DOI: 10.1109/vetecs.2010.5493975. dirección: <https://doi.org/10.1109/vetecs.2010.5493975>.
- [19] R. Schmidt, T. Leinmuller, E. Schoch, F. Kargl y G. Schafer, “Exploration of adaptive beaconing for efficient intervehicle safety communication”, *IEEE Network*, vol. 24, n.º 1, págs. 14-19, 2010. DOI: 10.1109/mnet.2010.5395778. dirección: <https://doi.org/10.1109/mnet.2010.5395778>.
- [20] M. Torrent-Moreno, J. Mittag, P. Santi y H. Hartenstein, “Vehicle-to-Vehicle Communication: Fair Transmit Power Control for Safety-Critical Information”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, n.º 7, págs. 3684-3703, 2009. DOI: 10.1109/tvt.2009.2017545. dirección: <https://doi.org/10.1109/tvt.2009.2017545>.
- [21] C. Sommer, O. Tonguz y F. Dressler, “Traffic information systems: efficient message dissemination via adaptive beaconing”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, n.º 5, págs. 173-179, 2011. DOI: 10.1109/mcom.2011.5762815. dirección: <https://doi.org/10.1109/mcom.2011.5762815>.
- [22] *Intelligent Transport System (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definition, ETSI specification TR 102 638, v.1.1.1*, 2009.
- [23] R. Chen, W.-L. Jin y A. Regan, “Broadcasting safety information in vehicular networks: issues and approaches”, *IEEE Network*, vol. 24,

- n.º 1, págs. 20-25, 2010. DOI: 10.1109/mnet.2010.5395779. dirección: <http://dx.doi.org/10.1109/MNET.2010.5395779>.
- [24] A. Rahim, F. B. Muhaya, M. Sher, Z. S. Khan e I. Ahmad, “Performance evaluation of broadcast techniques in VANETs”, *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 2, págs. 52-55, 2009. DOI: 10.17485/ijst/2009/v2i10/30721. dirección: <http://dx.doi.org/10.17485/ijst%2F2009%2Fv2i10%2F30721>.
- [25] K. Obraczka, K. Viswanath y G. Tsudik, “Flooding for reliable multicast in multi-hop ad hoc networks”, *Wireless Networks*, vol. 7, n.º 6, págs. 627-634, 2001. DOI: 10.1023/a:1012323519059. dirección: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1012323519059>.
- [26] Y. Mylonas, M. Lestas y A. Pitsillides, “Speed Adaptive Probabilistic Flooding in Cooperative Emergency Warning”, en *Proceedings of the 4th Annual International Conference on Wireless Internet*, ép. WICON ’08, Maui, Hawaii, USA: ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics y Telecommunications Engineering), 2008, ISBN: 978-963-9799-36-3. dirección: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1554126.1554228>.
- [27] A. Mohammed, M. Ould-Khaoua, L. M. Mackenzie y J.-D. Abdulai, “Dynamic probabilistic counter-based broadcasting in mobile ad hoc networks”, en *2009 2nd International Conference on Adaptive Science & Technology (ICAST)*, Accra, Ghana: Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2009, págs. 120-127. DOI: 10.1109/icastech.2009.5409735. dirección: <http://dx.doi.org/10.1109/ICASTECH.2009.5409735>.

- [28] B. Bako, F. Kargl, E. Schoch y M. Weber, "Evaluation of Position Based Gossiping for VANETs in an Intersection Scenario", en *2008 Fourth International Conference on Networked Computing and Advanced Information Management*, Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2008, págs. 397-402. DOI: 10.1109/ncm.2008.159. dirección: <http://dx.doi.org/10.1109/NCM.2008.159>.
- [29] A. Bachir y A. Benslimane, "A multicast protocol in ad hoc networks inter-vehicle geocast", en *The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring.*, IEEE. DOI: 10.1109/vetecs.2003.1208832. dirección: <https://doi.org/10.1109/vetecs.2003.1208832>.
- [30] G. Korkmaz, E. Ekici, F. Özgüner y Ümit Özgüner, "Urban multi-hop broadcast protocol for inter-vehicle communication systems", en *Proceedings of the first ACM workshop on Vehicular ad hoc networks - VANET 04*, ACM Press, 2004. DOI: 10.1145/1023875.1023887. dirección: <https://doi.org/10.1145/1023875.1023887>.
- [31] O. Tonguz, N. Wisitpongphan, F. Bait, P. Mudaliget y V. Sadekart, "Broadcasting in VANET", en *2007 Mobile Networking for Vehicular Environments*, IEEE, 2007. DOI: 10.1109/move.2007.4300825. dirección: <https://doi.org/10.1109/move.2007.4300825>.
- [32] D. Kim, C.-K. Toh, J.-C. Cano y P. Manzoni, "A bounding algorithm for the broadcast storm problem in mobile ad hoc networks", en *2003 IEEE Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003.*, New Orleans, LA, USA: Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), págs. 1131-1136. DOI: 10.1109/wcnc.2003.1200530. dirección: <http://dx.doi.org/10.1109/WCNC.2003.1200530>.

- [33] L. A. Villas, H. S. Ramos, A. Boukerche, D. L. Guidoni, R. B. Araujo y A. A. Loureiro, “An efficient and robust data dissemination protocol for vehicular ad hoc networks”, en *Proceedings of the 9th ACM symposium on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks - PE-WASUN 12*, ACM Press, 2012. DOI: 10.1145/2387027.2387035. dirección: <https://doi.org/10.1145/2387027.2387035>.
- [34] M. Li, K. Zeng y W. Lou, “Opportunistic broadcast of event-driven warning messages in Vehicular Ad Hoc Networks with lossy links”, *Computer Networks*, vol. 55, n.º 10, págs. 2443-2464, 2011. DOI: 10.1016/j.comnet.2011.04.005. dirección: <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2011.04.005>.
- [35] K. N. Nakorn y K. Rojviboonchai, “Non-GPS Data Dissemination for VANET”, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2014, págs. 1-17, 2014. DOI: 10.1155/2014/906084. dirección: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/906084>.
- [36] A. Laouiti, P. Muhlethaler e Y. Toor, “Reliable opportunistic broadcast in VANETs (R-OB-VAN)”, en *2009 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications, (ITST)*, IEEE, 2009. DOI: 10.1109/itst.2009.5399325. dirección: <https://doi.org/10.1109/itst.2009.5399325>.
- [37] M. Booyesen, G.-J. van Rooyen y S. Zeadally, “Survey of media access control protocols for vehicular ad hoc networks”, *IET Communications*, vol. 5, n.º 11, págs. 1619-1631, 2011. DOI: 10.1049/iet-com.2011.0085. dirección: <https://doi.org/10.1049/iet-com.2011.0085>.

- [38] B. Blaszczyszyn, A. Laouiti, P. Muhlethaler e Y. Toor, “Opportunistic broadcast in VANETs (OB-VAN) using active signaling for relays selection”, en *2008 8th International Conference on ITS Telecommunications*, Phuket, Thailand: Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2008, págs. 384-389. DOI: 10.1109/itst.2008.4740291. dirección: <http://dx.doi.org/10.1109/ITST.2008.4740291>.
- [39] J. Harri, F. Filali y C. Bonnet, “Mobility models for vehicular ad hoc networks: a survey and taxonomy”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, n.º 4, págs. 19-41, 2009. DOI: 10.1109/surv.2009.090403. dirección: <https://doi.org/10.1109/surv.2009.090403>.
- [40] Paramics, *Microscopic Traffic Simulation*, <http://www.paramics-online.com>.
- [41] CORSIM, *Microscopic Traffic Simulation Model*, <http://www-mctrans.ce.ufl.edu/featured/TSIS/Version5/corsim.htm>.
- [42] PTV Group, *VISSIM*, <http://www.english.ptv.de/cgi-bin/traffic/trafvissim.pl>.
- [43] TRANSIMS, *TRansportation ANalysis SIMulation System*, <http://code.google.com/p/transims/>
- [44] *Microscopic and Continuous Road Traffic Simulator*, Simulation of Urban MObility (SUMO). dirección: <http://sumo-sim.org>.
- [45] M. Treiber, A. Hennecke y D. Helbing, “Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations”, *Physical Review E*, vol. 62, n.º 2, págs. 1805-1824, 2000. DOI: 10.1103/physreve.62.1805. dirección: <https://doi.org/10.1103/physreve.62.1805>.
- [46] *Network Simulator 3 (NS-3): Discrete Event Network Simulator*. dirección: <http://nsnam.org>.

- [47] J. Bu, *Implementation of WAVE 1609.4/802.11p module for NS-3*. dirección: <https://www.nsnam.org/wiki/index.php/GSOC2013WAVEMAC>.
- [48] L. Miao, K. Djouani, B. J. V. Wyk e Y. Hamam, "Performance evaluation of IEEE 802.11p MAC protocol in VANETs safety applications", en *2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Institute of Electrical y Electronics Engineers (IEEE), 2013. DOI: 10.1109/wcnc.2013.6554813. dirección: <https://doi.org/10.1109%2Fwcnc.2013.6554813>.
- [49] K. Sjoberg, E. Uhlemann y E. G. Strom, "Delay and interference comparison of CSMA and self-organizing TDMA when used in VANETs", en *2011 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, Institute of Electrical y Electronics Engineers (IEEE), 2011. DOI: 10.1109/iwcmc.2011.5982758. dirección: <https://doi.org/10.1109%2Fiwcmc.2011.5982758>.
- [50] E. Garcia-Lozano, C. Campo, C. Garcia-Rubio y A. Cortes-Martin, "Bandwidth efficient broadcasting in VANETs", en *2012 8th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Institute of Electrical y Electronics Engineers (IEEE), 2012. DOI: 10.1109/iwcmc.2012.6314358. dirección: <https://doi.org/10.1109%2Fiwcmc.2012.6314358>.
- [51] N. Toorchi, M. A. Attari, M. S. Haghighi e Y. Xiang, "A Markov model of safety message broadcasting for vehicular networks", en *2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Institute of Electrical y Electronics Engineers (IEEE), 2013. DOI: 10.1109/wcnc.2013.6554812. dirección: <https://doi.org/10.1109%2Fwcnc.2013.6554812>.

- [52] G. el mouna Zhioua, N. Tabbane, H. Labiod y S. Tabbane, "A Fuzzy Multi-Metric QoS-Balancing Gateway Selection Algorithm in a Clustered VANET to LTE Advanced Hybrid Cellular Network", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, n.º 2, págs. 804-817, 2015. DOI: 10.1109/tvt.2014.2323693. dirección: <https://doi.org/10.1109/tvt.2014.2323693>.
- [53] Y. Zeng, K. Xiang, D. Li y A. V. Vasilakos, "Directional routing and scheduling for green vehicular delay tolerant networks", *Wireless Networks*, vol. 19, n.º 2, págs. 161-173, 2012. DOI: 10.1007/s11276-012-0457-9. dirección: <http://dx.doi.org/10.1007/s11276-012-0457-9>.
- [54] Y. Li, K. Ying, P. Cheng, H. Yu y H. Luo, "Cooperative data dissemination in cellular-VANET heterogeneous wireless networks", en *2012 4th International High Speed Intelligent Communication Forum*, Institute of Electrical y Electronics Engineers (IEEE), 2012. DOI: 10.1109/hsic.2012.6212991. dirección: <https://doi.org/10.1109/hsic.2012.6212991>.
- [55] S. Sai, T. Oshida, R. Onishi, A. Yoshioka y H. Tanaka, "Comparisons of Non-line-of-Sight Inter-Vehicle Communications in the urban environment between 5.9GHz and 700MHz bands (Poster)", en *2012 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Institute of Electrical y Electronics Engineers (IEEE), 2012. DOI: 10.1109/vnc.2012.6407423. dirección: <https://doi.org/10.1109/vnc.2012.6407423>.
- [56] Y. Ohta, T. Ohta, E. Kohno e Y. Kakuda, "A Store-Carry-Forward-Based Data Transfer Scheme Using Positions and Moving Direction

- of Vehicles for VANETs”, en *2011 Tenth International Symposium on Autonomous Decentralized Systems*, Institute of Electrical y Electronics Engineers (IEEE), 2011. DOI: 10.1109/isads.2011.22. dirección: <https://doi.org/10.1109%2Fisads.2011.22>.
- [57] A. Y. Al-Dubai, M. B. Khalaf, W. Gharibi y J. Ouenniche, “A New Adaptive Probabilistic Broadcast Protocol for Vehicular Networks”, en *2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Institute of Electrical y Electronics Engineers (IEEE), 2015. DOI: 10.1109/vtcspring.2015.7145627. dirección: <https://doi.org/10.1109%2Fvtcspring.2015.7145627>.
- [58] X. Wang, C. Li, L. Zhu y C. Zhao, “An effective routing protocol for intermittently connected vehicular ad hoc networks”, en *2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Institute of Electrical y Electronics Engineers (IEEE), 2013. DOI: 10.1109/wcnc.2013.6554828. dirección: <https://doi.org/10.1109%2Fwcnc.2013.6554828>.
- [59] M. Bakhouya, J. Gaber y P. Lorenz, “An adaptive approach for information dissemination in Vehicular Ad hoc Networks”, *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 34, n.º 6, págs. 1971-1978, 2011. DOI: 10.1016/j.jnca.2011.06.010. dirección: <https://doi.org/10.1016%2Fj.jnca.2011.06.010>.
- [60] P. S. N. Darisini y N. S. Kumari, “A survey of routing protocols for VANET in urban scenarios”, en *2013 International Conference on Pattern Recognition, Informatics and Mobile Engineering*, Institute of Electrical y Electronics Engineers (IEEE), 2013. DOI: 10.1109/icprime.

- 2013.6496522. dirección: <https://doi.org/10.1109%2Ficprime.2013.6496522>.
- [61] F. J. Ros, P. M. Ruiz e I. Stojmenovic, “Reliable and Efficient Broadcasting in Vehicular Ad Hoc Networks”, en *VTC Spring 2009 - IEEE 69th Vehicular Technology Conference*, Institute of Electrical y Electronics Engineers (IEEE), 2009. DOI: 10.1109/vetecs.2009.5073834. dirección: <https://doi.org/10.1109%2Fvetecs.2009.5073834>.
- [62] M. Slavik, I. Mahgoub y M. M. Alwakeel, “Analysis of beaconing message rate in VANET multi-hop broadcast protocols”, en *High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies*, Institute of Electrical y Electronics Engineers (IEEE), 2012. DOI: 10.1109/honet.2012.6421431. dirección: <https://doi.org/10.1109%2Fhonet.2012.6421431>.



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE DISERTACIÓN PÚBLICA

No. 00006

Matrícula: 2113802450

OPTIMIZACIÓN DE MECANISMOS
PARA LA DIFUSIÓN DE
INFORMACIÓN EN REDES
VEHICULARES

En la Ciudad de México, se presentaron a las 12:30 horas del día 22 del mes de noviembre del año 2017 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DR. ENRIQUE STEVENS NAVARRO
DRA. GRACIELA ROMAN ALONSO
DR. MIGUEL LOPEZ GUERRERO
DR. ULISES PINEDA RICO
DR. VICTOR MANUEL RAMOS RAMOS



SALVADOR GONZALEZ ARELLANO
ALUMNO

Bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretario el último, se reunieron a la presentación de la Disertación Pública cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS (CIENCIAS Y TECNOLOGIAS DE LA INFORMACION)

DE: SALVADOR GONZALEZ ARELLANO

y de acuerdo con el artículo 78 fracción IV del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

APROBAR

Acto continuo, el presidente del jurado comunicó al interesado el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.

REVISÓ

LIC. JULIO CESAR DE LARA ISASSI
DIRECTOR DE SISTEMAS ESCOLARES

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBI

DR. JOSE GILBERTO CORDOBA HERRERA

PRESIDENTE

DR. ENRIQUE STEVENS NAVARRO

VOCAL

DRA. GRACIELA ROMAN ALONSO

VOCAL

DR. MIGUEL LOPEZ GUERRERO

VOCAL

DR. ULISES PINEDA RICO

SECRETARIO

DR. VICTOR MANUEL RAMOS RAMOS