



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

IDÓNEA COMUNICACIÓN DE RESULTADOS

**Análisis del proceso de pérdidas de paquetes de
difusión en redes vehiculares IEEE 802.11p/WAVE**

Autor:

Lic. Salvador Gonzalez Arellano

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

Asesor:

Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos

Posgrado en Ciencias y Tecnologías de la Información

Sustentada el 19 de Agosto del 2013 ante el jurado:

Dr. Enrique Stevens Navarro, UASLP, Presidente

Dra. Graciela Román Alonso, UAM-I, Vocal

Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos, UAM-I, Secretario

Resumen

El estándar IEEE 802.11p describe la operación a nivel físico y de enlace de datos de redes vehiculares. Estas redes comprenden el intercambio de información entre vehículos y entre vehículos e infraestructuras a la orilla de la carretera. Por su importancia, resulta vital optimizar el análisis y la operación de cada aspecto del estándar IEEE 802.11p. En este trabajo, nos concentramos en el análisis del proceso de pérdidas de paquetes de difusión en el canal de control de IEEE 802.11p. Los paquetes de difusión son parte fundamental en el funcionamiento del canal de control, pues es mediante el proceso de difusión que se envían mensajes de seguridad vial, de información sobre la posición y movimiento del vehículo, y se establecen los servicios para alguno de los canales destinados para dicho propósito. Existe en la literatura trabajo relacionado a los paquetes de difusión sobre el canal de control, en donde se proponen modelos analíticos para analizar el proceso de pérdidas. Aunque esos trabajos no toman en cuenta todos o al menos la mayoría de los fenómenos que afectan a las redes vehiculares, podemos obtener una buena aproximación del desempeño que puede presentar este tipo de redes. Tomando en cuenta lo anterior, en este trabajo presentamos un análisis del proceso de pérdidas de difusión en el canal de control de las redes vehiculares, adaptando un simulador de eventos discretos a nuestras necesidades, para así poder considerar diversos factores que afectan a este tipo de redes. Realizamos una extensa campaña de simulaciones para estudiar el porcentaje de pérdidas promedio en la transmisión de paquetes de difusión sobre el canal de control para comparar con un modelo analítico recientemente propuesto por Claudia Campolo et al. Comprobamos la relación existente entre la ventana de contención, el tamaño del paquete y la cantidad de vehículos con el porcentaje de pérdidas, el cual incluye pérdidas por ruido, por colisión, por terminal oculta y por cambio de canal. Encontramos que nuestros resultados validan parcialmente los obtenidos por Campolo y también ofrecemos un análisis adicional no reportado en trabajos previos.

Abstract

The IEEE 802.11p standard describes the physical and data link operation for vehicular networks. This includes the exchange of information among vehicles and between vehicles and the infrastructure on the roadside as well. Thus, it is crucial to optimize the analysis and operation of every aspect of the IEEE 802.11p standard. In this work, we analyze the loss process of broadcast packets for the control channel of IEEE 802.11p. Broadcast packets are a key part on the operation of the control channel since it is by means of broadcast that road-safety messages, vehicle information messages, and motion messages are sent. We can find in the literature analytical models studying the loss process of broadcast packets on the control channel. Even if such models do not consider the whole set of phenomena affecting vehicular networks, or at least most of them, they are able to get a good approximation of the performance that may exhibit such networks. We thus present in this work the more complete analysis, to our best knowledge, of the loss process of broadcast packets in the control channel for vehicular networks. To do so, we realize an intensive campaign of simulations with the NS-3 simulator and compare our results with an analytical model recently proposed by Campolo et al. Then, we verify the relationship between the contention window, the packet size, and the number of vehicles with the loss percentage. Our analysis includes losses caused by noise, packet collisions, hidden terminal, and losses due to channel changes. We find that our results partially validate the results obtained by Campolo, and we also provide an additional analysis not reported previously in the literature.

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. Así mismo agradezco al CONACYT por brindarme la beca que me permitió cumplir este gran sueño.

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

Contenido

Resumen	I
Agradecimientos	III
Lista de Figuras	VI
Lista de Tablas	VII
Acrónimos	VIII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
2.1. Canales de propagación	3
2.1.1. Propiedades de los canales	4
2.1.2. Medios de propagación	4
2.1.3. Antenas vehiculares	5
2.1.4. Canales Vehículo a Infraestructura (V2I)	7
2.1.5. Canales Vehículo a Vehículo (V2V)	8
2.1.6. Modelos de canales vehiculares	9
2.2. Estándar para WAVE IEEE 802.11p	10
2.2.1. Descripción general	11
2.3. Objetivos	13
3. Estado del arte sobre broadcast en los sistemas WAVE	14
3.1. Broadcast en el canal de control	14
3.2. Modelos para broadcast en el canal de control	15
3.3. Caracterización de las pérdidas en broadcast sobre el canal de control en IEEE 802.11p	16
4. Modelos de movilidad	21
4.1. Modelos sintéticos	21
4.2. Modelos basados en observaciones	22
4.3. Modelos basados en trazas	22
4.4. Modelos basados en simuladores de tráfico	22
4.5. Modelo IDM	23

5. Simulador de eventos discretos	24
5.1. Módulo para la simulación de VANETs	24
5.2. Modificaciones al simulador y al módulo para la simulación de VANETs .	26
6. Evaluación	29
6.1. Escenarios propuestos	29
6.1.1. Escenario simple de dos vías	29
6.1.2. Escenario para una intersección	30
6.2. Medidas de desempeño	30
6.3. Consideraciones del sistema	31
6.4. Parámetros del sistema	31
6.5. Resultados	32
7. Conclusiones	39
7.1. Trabajo futuro	40

Lista de figuras

1.1. Capas de los sistemas WAVE.	2
2.1. Posición de la antena montada en un vehículo.	6
3.1. Probabilidad de pérdidas de paquetes contra el numero de nodos en el sistema $W = 4, 16$	18
3.2. Probabilidad de pérdidas de paquetes contra el número de nodos en el sistema $W = 16, 128$	19
3.3. Probabilidad de pérdidas de paquetes debido a que expira el intervalo del canal de control.	20
6.1. Escenario simple de dos vías.	30
6.2. Escenario de una intersección.	31
6.3. Porcentaje de pérdidas contra número de nodos para el escenario de dos vías.	32
6.4. Porcentaje de pérdidas contra número de nodos para el escenario de la intersección.	33
6.5. Porcentajes para cada tipo de pérdida con $W = 16, 128$ y $L = 300$	34
6.6. Porcentaje de pérdidas contra número de nodos para el escenario de la intersección, con $W = 16, 128, 512, 1024$	36
6.6. Porcentajes para cada tipo de pérdida con $W = 16, 128, 512$ y 1024 y $L = 300$	38

Lista de tablas

5.1. Parámetros configurables.	25
6.1. Parámetros de los escenarios.	32

Acrónimos

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
UDP	U ser D atagram P rotocol
TCP	T ransmission C ontrol P rotocol
WSMP	W AVE S hort M essage P rotocol
LLC	L ogical L ink C ontrol
MAC	M edium A ccess C ontrol
MLME	M AC L ayer M anagement E ntity
PLME	P HY L ayer M anagement E ntity
V2I	C omunicación V ehículo a I nfraestructura
V2V	C omunicación V ehículo a V ehículo
BS	B ase S tation
AP	A ccess P oint
OFDM	O rthogonal F requency D ivision M ultiplexing
UTC	U niversal T ime C oordinated
EDCA	E nhanced D istributed C hannel A ccess
SIFS	S hort I nter F rame S pace
IDM	I ntelligent D river M odel
BSS	B asic S ervice S et
WSA	W AVE S ervice A dvertisement

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 (*VANETs* por sus siglas en inglés) logren ofrecer una amplia variedad de servicios como la información del tráfico, prevención contra accidentes, entretenimiento, 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.

En cuanto a las infraestructuras se refiere, tenemos dos posibles formas de comunicación, una entre un vehículo y un dispositivo ubicado en la orilla del camino (V2I) y entre un vehículo y otro vehículo (V2V). Con base a estas dos formas de comunicación se puede tener información confiable durante todo el camino y cualquier vehículo puede aportar información sobre el estado vial o cualquier otra información que desee compartir.

Para que la comunicación entre las infraestructuras mencionadas anteriormente pueda llevarse a cabo, 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, el IEEE 802.11p cubre la capa física y la de enlace de la pila de protocolos para los sistemas WAVE [2], tal como se muestra en la Figura 1.1.

En este trabajo, realizamos una extensa campaña de simulaciones sobre distintos escenarios para, por un lado, validar el modelo analítico de Claudia Campolo et al. [3], ya que es el más completo en la literatura, y por otro, encontrar los límites de uso del canal de control, en términos del porcentaje de pérdidas, en función de la carga de tráfico en la red. El trabajo se desarrolla de la siguiente manera, en el Capítulo 2 presentamos los antecedentes del trabajo, en el Capítulo 3 presentamos la manera en que opera el *broadcast*, los modelos propuestos en la literatura y la caracterización de pérdidas para el *broadcast* en los sistemas WAVE, en el Capítulo 4 presentamos el modelo de movilidad utilizado para las simulaciones, en el Capítulo 5 se presenta el simulador de eventos discretos, sus módulos agregados y modificaciones para nuestras simulaciones, en el Capítulo 6 se presentan los escenarios y parámetros utilizados para evaluar las pérdidas del sistema WAVE para el IEEE 802.11p, así como los resultados obtenidos de las simulaciones. Finalmente en el Capítulo 7 damos las conclusiones de este trabajo.

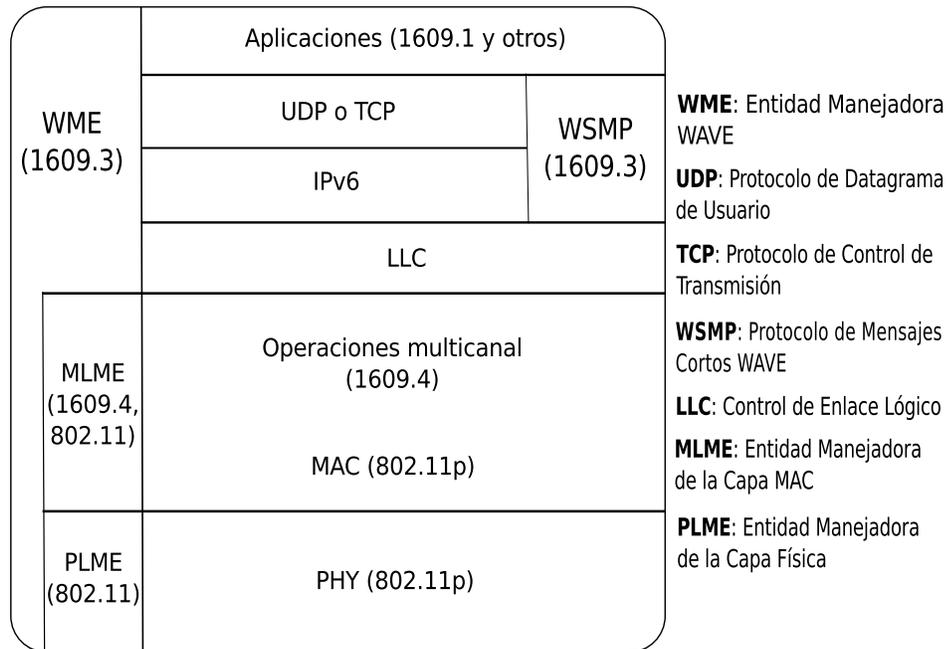


FIGURA 1.1: Capas de los sistemas WAVE.

Capítulo 2

Antecedentes

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*, pero no todos los canales tienen el mismo propósito. Uno de los canales, el central, es el canal de control, el cual está designado a ser el canal por el que se difunden mensajes seguros, mensajes que requieren fiabilidad, el resto de los canales están designados para la comunicación de baja prioridad.

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 concientizar a los conductores sobre el estado de la carretera a su alrededor. Los *beacons* se generan con una frecuencia típica de entre 5 y 10 *Hz* [4], lo cual podría causar una congestión en el canal de control, y por lo tanto provocar pérdidas de dichos *beacons*, que pueden afectar en gran medida el desempeño de las aplicaciones *VANETs*.

Para las aplicaciones que pueden ser tolerantes al retardo y/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*), para que una vez

aceptada la petición del servicio se cambie de canal y se lleve a cabo dicho servicio sobre uno de los seis canales destinados para los *BBS*.

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, además 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 vehiculares se suele hacer una distinción entre los canales para las comunicaciones V2I y las V2V. Para los escenarios de comunicación V2V no existen las estaciones base (BS) ni los puntos de acceso (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 dependiendo de la cantidad de vehículos presentes en la vía, el ambiente en el que se encuentre (campo, urbano, ciudad, etc.), por mencionar algunos. Para los escenarios de comunicación V2I el canal de propagación es similar al de una micro-red 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 que se propaga la señal desde los transmisores hasta los receptores, ya sean receptores que desean recibir la señal o no. 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 habíamos mencionado, las características del medio de propagación dependen del medio 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 [5]. 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 suelen no haber 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.

Sin embargo, esta caracterización no es suficiente para todas las aplicaciones, algunas de estas pueden requerir otras rutas de propagación.

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 2.1 [4].

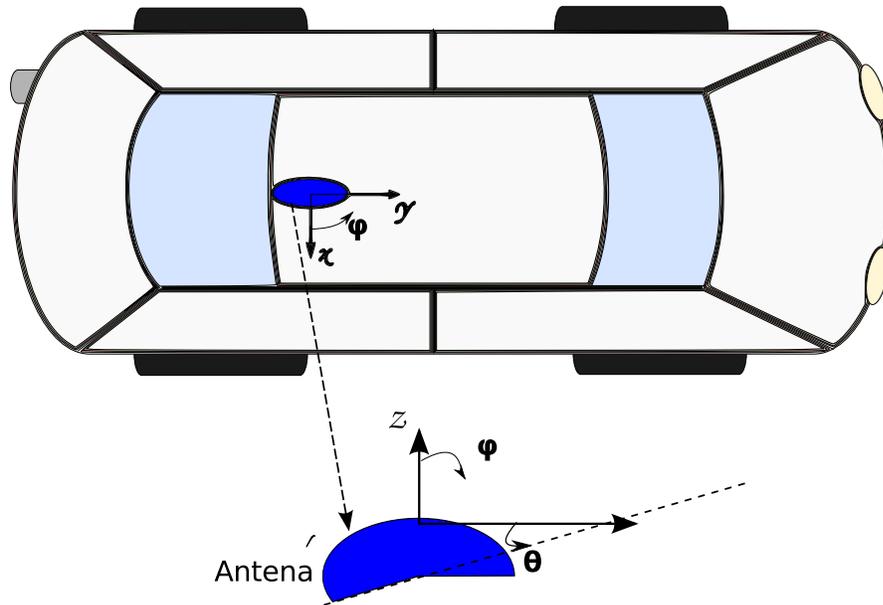


FIGURA 2.1: Posición de la antena montada en un vehículo.

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* [6]. Además, las técnicas de antenas múltiples permiten una mayor fiabilidad, escalabilidad, robustez en el sistema y minimizar las interferencias en redes vehiculares con mucha carga (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, las cuales pueden ser utilizadas 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 macro celular** 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 micro celular** 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 cubierta por infraestructura celular o por 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 para cubrir los embotellamientos y prevenir accidentes.
- **Cobertura en las autopistas**, donde los puntos de acceso se colocan a la altura de los vehículos ya sea reemplazando o aumentando los puestos de los teléfonos 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 macro celular.

Para los escenarios mencionados anteriormente, existen modelos que pueden ser utilizados como por ejemplo; *COST 259 Directional Channel Model* [7], el *COST 273 Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO) Model* [8] y sus extensiones, el modelo de canal espacial 3GPP [9] y el *WINNER Channel Model* [10] 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 y 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 [11] y el de A. Paier et al. [12].

Como hemos visto en la Sección 2.1.2, 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 [4], 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 del rms en el retardo por dispersión en la autopista está en el rango 40 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 [11], este modelo especifica dos exponentes de *pathloss*, para una distancia aproximada 200 m 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 del rms 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 el modelo *break point* se encontró que se adecua de buena manera, con un exponente de *pathloss* $n = [2, 2.1]$ para distancias inferiores a 100 m y $n = 4$ mas allá de dicha distancia. La media del rms 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 del rms en el 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 vehiculares. Lo más importante a modelar son el *pathloss*, el retardo, el efecto doppler, el desvanecimiento y la no estacionariedad del canal. Para los canales vehiculares, se distinguen tres tipos de modelos de canales que son:

- **Modelo tap delay:** en los modelos de *tap delay*, la respuesta al impulso del canal se modela con componentes a ciertos retrasos (*taps*), por lo tanto, el canal se modela por una línea de retardo llamada *tapping* (TDL). La potencia media de los *taps* se supone que atenúan 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 ser modelado con una fuerte conexión en línea de vista entre Tx y Rx (lo que nos lleva a un desvanecimiento de Ricean), o sin línea de vista (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 (por ejemplo, vehículos, edificios, la propia carretera, señales de tráfico, follaje, entre otros), pero 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 hay un camino directo desde Tx a Rx, el componente pierde ganancia cada vez que un objeto obstruye el camino directo (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.

2.2. Estándar para WAVE 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 en 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 de los 5.9 GHz de 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 IEE 802.11p en febrero de 2006.

2.2.1. Descripción general

El IEEE 802.11p ha publicado recientemente una serie de especificaciones de la capa física y el Control de Acceso al Medio (MAC) para permitir las comunicaciones 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 la señal y especificaciones del IEEE 802.11a con excepción de los siguientes cambios:

1. Como ya se había mencionado, el IEEE 802.11p opera en la banda de frecuencia de los 5.9 GHz , 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 se definen cuatro clases de *Effective Isotropic Radiated Power* (que es la cantidad de energía que tendría que ser emitida por una antena isotrópica) en el estándar, 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 del IEEE 802.11p en comparación con los del 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), *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 a transmitir, de alguna de las clases (AC) mencionadas en la Sección 2.2.1, 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 mediante una distribución uniforme sobre el intervalo $[0, CW[AC]]$, donde $CW[AC]$ es la ventana de contención para la clase AC . En la primera transmisión, el $CW[AC]$ es igual al $CW_{min}[AC]$ y se duplica en cada retransmisión con un límite máximo igual al máximo $CW[AC]$, el contador de *backoff* se decrementa al final de cada ranura de tiempo, mientras que el medio se encuentre inactivo, si durante la cuenta atrás del *backoff* el canal se detecta como ocupado, entonces, la cuenta atrás 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 de *backoff* llegue a cero.

2.3. Objetivos

Una vez que hemos enmarcado el contexto de este trabajo, a continuación se describen de manera puntual el objetivo general y los objetivos particulares que se persiguen.

Objetivo general: Realizar un profundo análisis del proceso de pérdidas de paquetes de difusión para las redes vehiculares IEEE 802.11p.

Objetivos específicos:

1. Ofrecer un conjunto de escenarios para redes vehiculares y validar el modelo analítico de Claudia Campolo et al.
2. Encontrar por medio de simulación los límites de uso del canal de control (en términos del porcentaje de pérdidas) en función de la carga de tráfico en la red.

Capítulo 3

Estado del arte sobre broadcast en los sistemas WAVE

3.1. Broadcast en el canal de control

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 [13], 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 [14] o en la tasa de generación de *beacons* [15].

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.

3.2. Modelos para broadcast en el canal de control

Para evaluar el desempeño del sistema, comúnmente se toman las siguientes métricas: el retardo en los paquetes, la probabilidad de colisión, la probabilidad de éxito en la recepción de los paquetes y el *throughput* (que es el volumen de información que fluye a través de un sistema). Para obtener las medidas de desempeño mencionadas anteriormente, varios modelos se han propuesto en la literatura, modelos específicos para determinar algunas de las métricas. A continuación, revisaremos brevemente los modelos más importantes propuestos hasta ahora.

En [16], los autores modelan la entrega exitosa de paquetes como una cadena de Markov para mensajes de emergencia y *beacons*. Para priorizar el acceso al canal sólo utilizan distintos valores para la ventana de contención, este modelo sólo toma en cuenta las pérdidas por colisiones y asume condiciones de saturación en la red. En [17], los autores utilizan una función para el canal distribuido con el fin de analizar la generación y transmisión de *beacons*, para poder determinar la probabilidad de tener transmisiones libres de colisiones. Como estos ejemplos podemos encontrar algunos más en la literatura, pero sólo pocos consideran la conmutación de los canales, la cual evidentemente impacta directamente en el rendimiento de la red.

En [18], se propone un modelo analítico para evaluar el desempeño del mecanismo para la coordinación de los canales para diferentes patrones de tráfico y diferentes intervalos de canal, sin embargo este trabajo se concentra en la transmisión de mensajes unicast y no broadcast, el cual es nuestro punto de atención. En [19], un modelo analítico es propuesto para evaluar el *throughput* y la probabilidad de colisión en una red 802.11p donde los nodos siempre tienen paquetes a enviar, el modelo estima la saturación del *throughput* sin tomar en cuenta la prioridad de los paquetes. En [3], Claudia Campolo

et al. proponen un modelo para la caracterización de las pérdidas de paquetes en el broadcast sobre el canal de control, el cual es una modificación del propuesto por ellos mismos en [20], donde se toma en cuenta la conmutación del canal, aunque no se hace diferencia en los posibles casos en que se pueden tener pérdidas de paquetes, dicha distinción y caracterización es agregada en [3] y en un trabajo posterior [21] se agrega el efecto de la prioridad en los distintos tipos de mensajes.

Como ya habíamos mencionado, nuestro punto de enfoque son los mensajes broadcast sobre el canal de control, sin embargo, cabe mencionar algunos trabajos relacionados que, aunque no se enfocan en los mensajes broadcast ni en el canal control, son trabajos similares y es importante mencionarlos. Hung-Chin Jang y Wen-Chieh Feng [22] realizan una propuesta para adaptar dinámicamente la ventana de contención para mejorar el *throughput* de IEEE 802.11p sobre los canales de servicio. C. Chrysostomou et al. [23], de manera similar proponen adaptar la ventana de contención para mejorar el *throughput*, pero dándole un enfoque a mejorar la calidad de servicio para las distintas prioridades de los mensajes, vistos en la Sección 2.2.1. Yi Wang [24] realiza un estudio del impacto que tiene la ventana de contención sobre el *throughput* del estándar, aunque no especifica para que canal, se aprecia el *throughput* para distintas ventanas de contención.

3.3. Caracterización de las pérdidas en broadcast sobre el canal de control en IEEE 802.11p

Como ya se había mencionado, Campolo et al. propusieron un modelo para caracterizar las pérdidas de broadcast sobre el canal de control, dicho modelo está basado en las especificaciones de IEEE 802.11p, las mencionadas en la Sección 2.2.1, además en el trabajo se asume lo siguiente: 1) todos los nodos están dentro de un rango de comunicación recíproca (no hay terminal oculta); 2) el vecindario a un salto de distancia no cambia significativamente debido a la movilidad de los vehículos en un intervalo de 50 *ms* (el intervalo que corresponde al canal de control).

Con las condiciones anteriores asumidas, los autores dan una caracterización de todos los posibles eventos que pueden ser experimentados por un broadcast en el canal de control, dichos posibles eventos son los siguientes: el tiempo del intervalo del canal de control no

es suficiente para enviar el paquete (*res*); el paquete se transmitió exitosamente (*suc*); pérdida del paquete debido al ruido (*noise*); colisión en la transmisión (*col*).

Para determinar la probabilidad de que k vehículos, de un total de n , transmitan en la ranura l , de un total de w , dado que en las $l-1$ ranuras anteriores no se intentó transmitir, Claudia Campolo et. al. proponen la Ecuación (3.1). La probabilidad es modelada como un proceso de Bernoulli, donde $\frac{1}{w-l+1}$ es la probabilidad de elegir uniformemente una ranura de las $w-l+1$ ranuras disponibles.

$$P(l, n, w, k) = \left(1 - \frac{l-1}{w}\right)^n \binom{n}{k} \left(\frac{1}{w-l+1}\right)^k \left(1 - \frac{1}{w-l+1}\right)^{n-k}. \quad (3.1)$$

Para modelar el número promedio de eventos del tipo ev que ocurren en el sistema con n vehículos, ventana de contención w y con t ranuras restantes en el intervalo del canal de control, los autores definen $X_{ev}(t, w, n)$ como sigue:

$$\begin{aligned} X_{ev}(t, w, n) = & \sum_{l=1}^{\min(w,t)} P(l, n, w, 1) (1 - BER)^L [C_{suc} + X_{ev}(t-l+1-s, w-l, n-1)] \\ & + P(l, n, w, 1) [1 - (1 - BER)^L] [C_{noise} + X_{ev}(t-l+1-c, w-l, n-1)] \\ & + \sum_{k=2}^n P(l, n, w, k) [kC_{col} + X_{ev}(t-l+1-c, w-l, n-k)]. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Los dos primeros términos de (3.2) representan la probabilidad de que uno de los n vehículos escoja un backoff de las w ranuras, y podrá transmitir exitosamente en la ranura l con probabilidad $(1 - BER)^L$ o experimentará un error en el canal con probabilidad $1 - (1 - BER)^L$. El término $X_{ev}(t-l+1-s, w-l, n-1)$ representa el número promedio de eventos del tipo ev en las restantes $t-l+1-s$ ranuras, y para la segunda contribución de $X_{ev}(t, w, n)$ representa el número promedio de colisiones cuando k ($k > 1$) de los n vehículos transmiten en la ranura l y, por lo tanto, incurren en colisiones. C_i con $i \in (suc, noise, col)$ es igual a 1 si $i = ev$ y 0 en otro caso. Basándose en (3.1) y (3.2) se obtiene la probabilidad para cualquier evento ev se calcula como se muestra a continuación.

$$P_{ev} = \frac{X_{ev}(T, W, N)}{N}. \quad (3.3)$$

Esto no es suficiente para calcular la probabilidad del evento *res*, para poder obtenerla se calcula de la siguiente forma:

$$P_{res} = 1 - P_{suc} - P_{noise} - P_{col}. \quad (3.4)$$

Evidentemente, el total de las pérdidas se puede obtener de la siguiente forma:

$$P_{loss} = 1 - P_{suc}. \quad (3.5)$$

Para validar su modelo, los autores lo comparan con simulaciones realizadas en Matlab, para su simulación se consideran los siguientes parámetros: BER igual a 10^{-4} ; ventana de contención $w = 4, 16$; el tamaño del paquete es de 300 bytes; el tiempo de ranura es de $16 \mu s$; el intervalo entre tramas más pequeño (SIFS por sus siglas en inglés) es de $32 \mu s$; el *Header length* (tiempo que tarda la capa física en colocar su encabezado

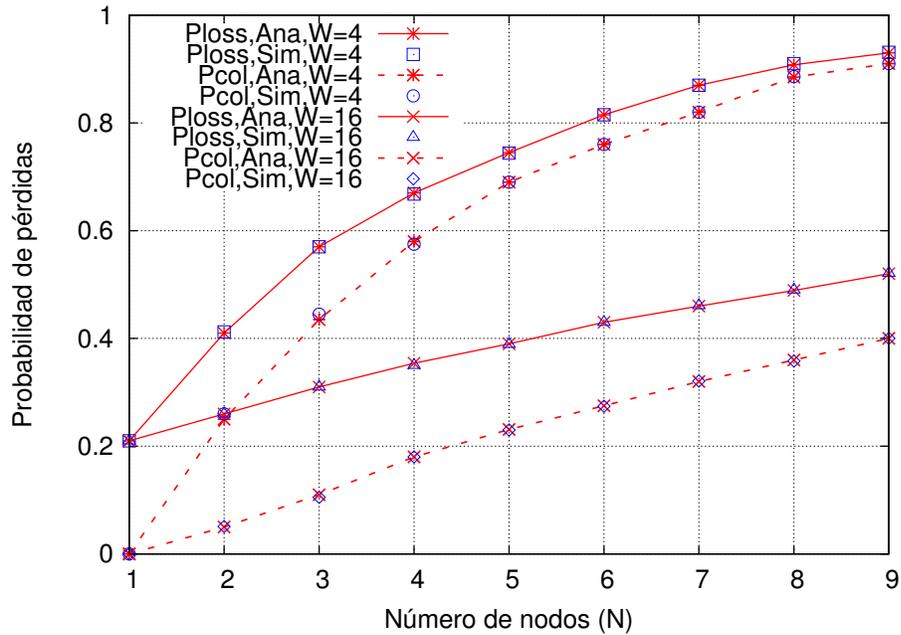


FIGURA 3.1: Probabilidad de pérdidas de paquetes contra el número de nodos en el sistema $W = 4, 16$.

para transmitir) es de $40 \mu s$ y la tasa de transmisión es de $3 Mbps$. Los resultados de la simulación contra el modelo analítico se muestran en la Figura 3.1 [3].

Los resultados muestran que el modelo analítico que proponen es estrechamente cercano a la simulación que realizaron en Matlab. Además se puede observar el desempeño que tiene el broadcast en el estándar IEEE 802.11p sobre el canal de control, es notorio que conforme se incrementa el número de nodos en el sistema, la probabilidad de colisiones lo hace también. Además, podemos observar también que mientras más alta sea la ventana de contención, la probabilidad de pérdidas y de colisiones son menores, sin embargo, la ventana de contención no puede crecer demasiado, está limitada por el intervalo de $50 ms$ que tiene para transmitir el canal de control. Los autores muestran el comportamiento del sistema con ventanas de contención más grandes y con tamaños de paquetes también más grandes, los resultados se observan en la Figura 3.2 [3].

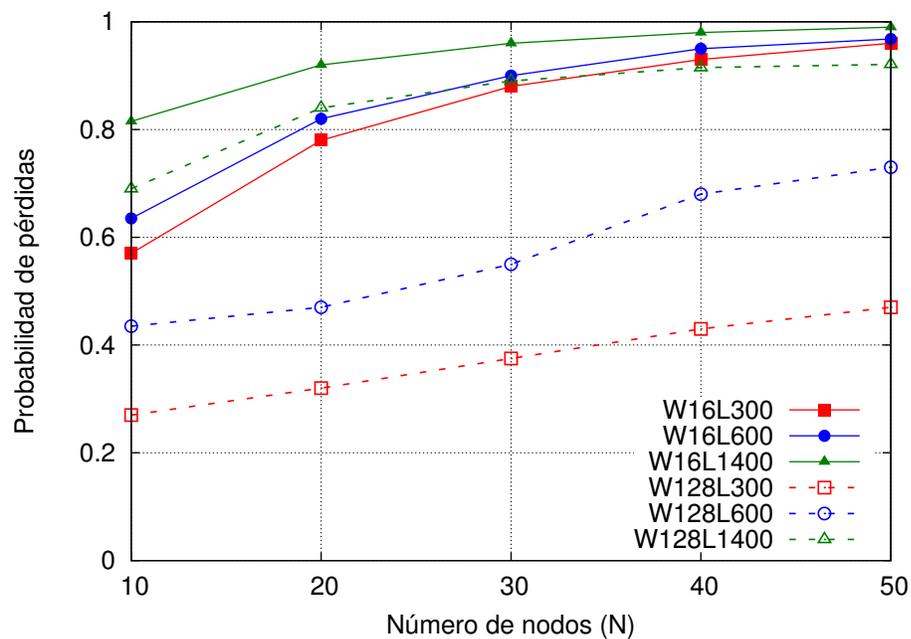


FIGURA 3.2: Probabilidad de pérdidas de paquetes contra el número de nodos en el sistema $W = 16, 128$.

Al incrementar la ventana de contención existe un compromiso, ya que los nodos pueden elegir un backoff mas grande, por lo que los paquetes pueden ser desechados debido a que expira el intervalo del canal de control, y esto se agrava más si el paquete es muy grande, en la Figura 3.3 [3] se muestra dicho comportamiento.

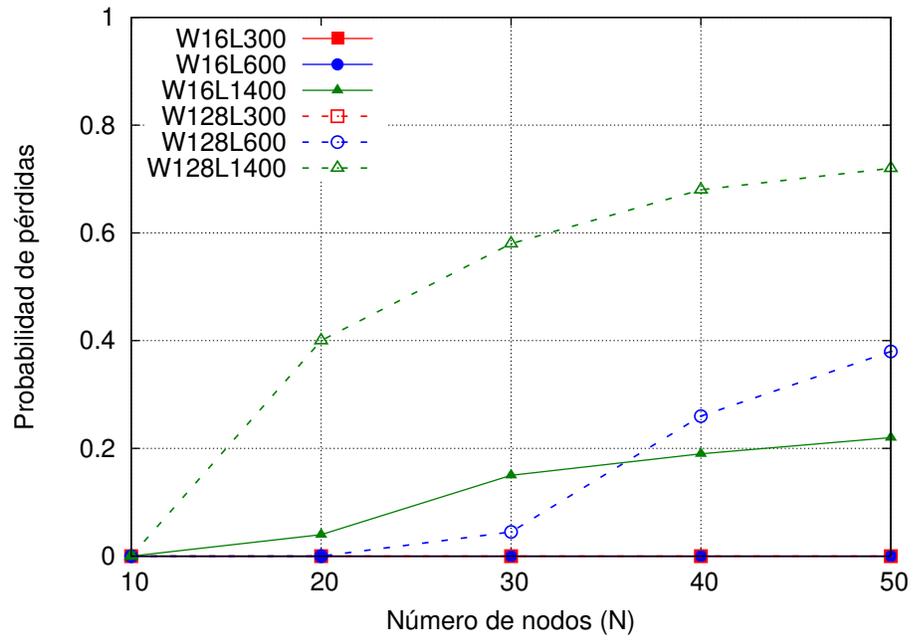


FIGURA 3.3: Probabilidad de pérdidas de paquetes debido a que expira el intervalo del canal de control.

Capítulo 4

Modelos de movilidad

Dado el reciente interés por comportamiento del 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 microscópicos. Los modelos macroscópicos se basan, principalmente, en la densidad de vehículos y/o el flujo de estos, mientras que los modelos microscópicos se concentran en el comportamiento individual de cada vehículo. Sin embargo, para poder modelar el tráfico vehicular se requieren de diversos componentes. La mayoría de estos 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 es también ampliamente ausente en la mayoría de los modelos. El comportamiento del conductor se limita a las aceleraciones o desaceleraciones suaves.

En [25], clasifican en cuatro categorías los diferentes modelos de movilidad vehicular: modelos sintéticos, modelos basados en observaciones, modelos basados en trazas y modelos basados en simuladores de tráfico.

4.1. 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 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.

4.2. Modelos basados en observaciones

Estos modelos, 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.

4.3. 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 pueden presentar.

4.4. Modelos basados en simuladores de tráfico

Para refinar los modelos sintéticos, o validarlos, algunas compañías y grupos de investigadores han desarrollado simuladores de tráfico vehicular. Los simuladores destacados son PARAMICS [26], CORSIM [27], VISSIM [28], TRANSIMS [29] y SUMO [30], los

cuales son capaces de simular tráfico microscópico urbano, consumo de energía, contaminación o nivel de ruido. Sin embargo, estos simuladores no arrojan trazas compatibles con los simuladores de redes, o requieren comprar una licencia para ser utilizados.

4.5. 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. El modelo es de una sola vía y es llamado *Intelligent Driver Model* (IDM) [31]. A diferencia de la mayoría de los modelos similares, el modelo IDM es simple, sólo tiene unos pocos parámetros intuitivos con valores reales, se reproduce una dinámica colectiva y realista, también posee una plausible aceleración y deceleración individual para cada vehículo. El modelo 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.

Capítulo 5

Simulador de eventos discretos

Para realizar nuestras simulaciones y poder evaluar el modelo analítico de Campolo et al. visto en la Sección 3.3, así como para encontrar los límites de uso del canal de control (en términos del ancho de banda) en función de la carga de tráfico en la red, decidimos elegir el simulador de eventos discretos NS-3 [32], 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 nos provee las herramientas necesarias para soportar el estándar IEEE 802.11p, pues ya cuenta con el modelo configurado tal como se menciona en la Sección 2.2.1. Desafortunadamente, NS-3 no nos ofrece una implementación de algún modelo de movilidad para vehículos que sea cercano a la realidad, ya que la mayoría de los modelos implementados en los simuladores convencionales están muy simplificados, por lo tanto para poder llevar a cabo las simulaciones se agregó un módulo a NS-3 desarrollado por Hadi Arbabi y Michele C. Weigle [33] en el cual está implementado el modelo IDM, además cuenta con un modelo de cambio de vía pues, el modelo IDM no cuenta con el.

5.1. Módulo para la simulación de VANETs

Ya que en la mayoría de los simulaciones para VANETs el tráfico de vehículos es pre-generado y la traza de movimiento se introduce en un simulador para determinar las

propiedades de la VANET, esta técnica no permite a los vehículos ajustar su comportamiento dinámicamente con base al estado del escenario. Arbabi y Weigle implementaron un módulo que se integra con NS-3. El módulo puede colocar vías en cualquier dirección, se conectan a otras vías y los vehículos puedan girar a la izquierda o derecha dependiendo del destino deseado, además contiene una funcionalidad básica de semáforo y una configuración basada en XML para indicar los parámetros de la simulación para cada uno de los objetos presentes en la simulación los cuales están indicados en la Tabla 5.1.

El archivo de configuración XML brinda la facilidad de crear un escenario como se desee pues se pueden crear múltiples vías fácilmente, conectarlas, indicar el flujo (o que sea aleatorio) en cada vía, especificar las características del vehículo y del dispositivo inalámbrico. De esta manera es fácil implementar un escenario concreto para observar el comportamiento de la red.

Objeto	Parámetro
Vía	<ul style="list-style-type: none"> - Punto de comienzo - Longitud - Número de carriles - Longitud del carril - Dirección
Dispositivo inalámbrico	<ul style="list-style-type: none"> - Estándar - Tipo de datos - Potencia del transmisor - Niveles de potencia del transmisor - Ganancia de las antenas - Umbral de detección
Generador de vehículos	<ul style="list-style-type: none"> - Flujo - Máxima y mínima velocidad - Tasa de equipamiento del dispositivo inalámbrico - Probabilidad de insertar un camión - Distancia mínima entre vehículos - Destino
Generador de semáforos	<ul style="list-style-type: none"> - Posición - Distancia - Lista de carriles
Vehículo	<ul style="list-style-type: none"> - Carril - Longitud - Anchura - Velocidad - Aceleración - Dirección

TABLA 5.1: Parámetros configurables.

5.2. Modificaciones al simulador y al módulo para la simulación de VANETs

A pesar de que el módulo de Arbabi y Weigle nos proporciona muchas facilidades para la implementación de escenarios para VANETs, el módulo no trabaja del todo bien para el canal de control del IEEE 802.11p, por lo que se le realizaron varias modificaciones para obtener un óptimo funcionamiento, ya que es de nuestro interés la simulación de paquetes de difusión sobre el canal de control. Dichas modificaciones al módulo son las siguientes:

- Ahora sólo funciona para el IEEE 802.11p sobre el canal de control, aunque en el archivo XML se puede elegir el estándar con el que se desea trabajar, esto debido a los pequeños pero muy significantes detalles que hacían que éste canal no funcionara de manera óptima, debido a los arreglos que se le tuvieron hacer, las demás opciones pueden no funcionar como se esperaría, pero para nuestro objetivo eso es irrelevante.
- El simulador permite programar el control de las comunicaciones, por defecto sólo era capaz de que un vehículo transmitiera en cada paso del simulador, así que se modificó para que en cada inicio del intervalo del canal de control todos los vehículos equipados con dispositivo inalámbrico transmitan, aunque esto puede variarse fácilmente para comprobar desde un posible mejor caso hasta el peor caso.
- Otro problema es que el intervalo para el intercambio de canales no estaba bien definido, por lo que se establece el evento para que cada 50 ms se intercambie entre el canal de servicio y el canal de control, aunque en el canal de servicio no pasa nada en cuanto a las transmisiones se refiere, sólo se sigue corriendo la movilidad, y al regresar al canal de control se realiza una nueva transmisión, al realizar el intercambio también se vacían las colas MAC de cada vehículo ya que el estándar indica que si no hay tiempo suficiente para transmitir entonces los paquetes se pierden por lo que las colas deben estar vacías al terminar el intervalo del canal de control y se reportan las pérdidas.

- Para complementar el punto anterior es necesario declarar el medio como ocupado al inicio del intervalo de los canales, pues así lo estipula el estándar. Como nuestro estudio se enfoca en el canal de control sólo ese fue modificado, simplemente utilizando la bandera que NS-3 ya posee para indicar si el medio está ocupado o no.
- El simple hecho de levantar la bandera que indica si el medio está ocupado o no, fue insuficiente para resolver el problema, pues NS-3 no utiliza dicha bandera para verificar el estado del medio, lo que hace es verificar si se está recibiendo un paquete o se está transmitiendo uno, lo cual tiene sentido pues son mensajes broadcast, así que para no alterar la forma en que revisa el estado del medio, sólo se agrega la comprobación del estado de la bandera si es que la comprobación que ya realizaba NS-3 es falsa.
- Cuando un paquete no tiene el tiempo suficiente para ser transmitido, éste debe descartarse y reportar la pérdida, dicho comportamiento no lo tenía el simulador, por lo que fue necesario agregarlo.
- Con el fin de tener una mejor organización en las trazas, cada una de las pérdidas se identifican con un valor numérico, para poder distinguirlas y contarlas por separado, aunque también se pueden contar todas juntas.
- Un problema importante del módulo es que cuando un vehículo abandona la vía, no es borrado inmediatamente, sólo se le borran las configuraciones del dispositivo inalámbrico para, en otro momento, borrar el vehículo con todos sus dispositivos, esto ocasiona que un vehículo que ya salió de la vía intente transmitir, obteniendo un fallo de segmentación debido a que la configuración del dispositivo inalámbrico fue borrada, así que no sabe que se hacen referencias a apuntadores nulos.
- NS-3 siempre utiliza la misma semilla para generar números aleatorios para sus simulaciones a menos que se le indique otra cosa, por lo que se agregó un *script* para no estar escribiendo una semilla nueva cada vez que se corra el simulador, se genera una semilla al azar mediante el bash de linux, el cual tiene semillas distintas pues las genera con la hora del sistema, así ya no es necesario estar cambiando la semilla en cada ejecución.

- NS-3 presentó un comportamiento no deseado al realizar las transmisiones, si un vehículo realiza una transmisión, el paquete le llega a todos los vehículos presentes, aun si se encuentran fuera del rango de transmisión, les llega la señal demasiado débil pero la detectan y la intentan recibir, lo cual provoca que ellos no puedan transmitir. Se filtró este comportamiento para que sólo tomen en cuenta señales que sean lo suficientemente fuertes, es decir, que cumplan con el umbral definido denominado *threshold* en NS-3.

Capítulo 6

Evaluación

Para poder evaluar el desempeño de los sistemas *WAVE* utilizando el simulador de eventos discretos NS-3 junto con el módulo modificado visto en la Sección 5.1, se proponen dos escenarios vehiculares, en los cuales se modifican parámetros de la simulación para poder obtener el porcentaje de pérdidas para cada una de las variaciones de parámetros y tener una visión más clara del comportamiento de los sistemas *WAVE*.

6.1. Escenarios propuestos

Con el fin de evaluar el desempeño de los sistemas *WAVE*, es necesario proponer simulaciones bajo distintos escenarios. En este trabajo, proponemos dos con los cuales podemos observar el comportamiento del sistema bajo condiciones que van desde una baja hasta una muy alta densidad vehicular.

6.1.1. Escenario simple de dos vías

Para observar el comportamiento del sistema en una carretera o autopista, proponemos un escenario simple de dos vías, dos carriles en un sentido y dos en sentido opuesto, de esta manera se tendrán comunicaciones entre vehículos en convoy y en sentidos opuestos. Este escenario lo analizamos pues es el que comúnmente encontramos en los trabajos relacionados. Nuestro escenario tiene una longitud de 1 *Km* y una separación entre carriles con distinta dirección de 10 *m*. En la Figura 6.1 se muestra el escenario simulado.

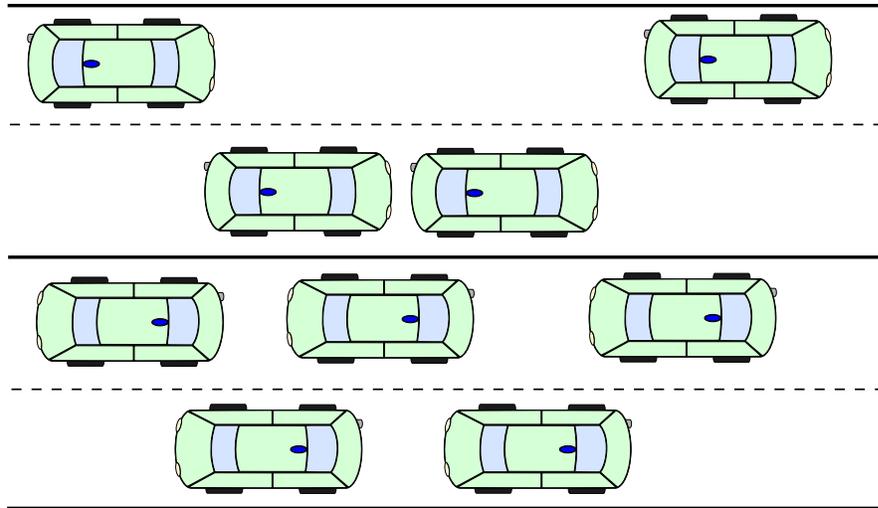


FIGURA 6.1: Escenario simple de dos vías.

6.1.2. Escenario para una intersección

También es necesario observar el comportamiento del sistema en ciudades, proponemos un escenario de una intersección, de esta manera podemos tener un mayor número de vehículos dentro del rango de transmisión y así poder verificar cómo cambia el comportamiento del sistema. Este escenario es interesante para ser estudiado, ya que lo encontramos cotidianamente en la vida real, y no ha sido muy estudiado en trabajos relacionados. Nuestro escenario tiene una longitud de 340 m tanto de izquierda hacia derecha como de arriba hacia abajo. En la Figura 6.2, se muestra el escenario que será simulado.

6.2. Medidas de desempeño

En este trabajo nos concentramos en el porcentaje de pérdidas de paquetes en el sistema, esto es debido a que se trata del canal de control y es importante que los paquetes lleguen a los vehículos, pues, como se había mencionado en la Sección 3, tenemos mensajes de seguridad, beacons y los mensajes para establecer una comunicación en los canales de servicio.

6.3. Consideraciones del sistema

Para las simulaciones sólo se considera la transmisión de un solo paquete en cada intervalo del canal de control, todos los vehículos transmiten, pero sólo un paquete. La simulación tiene una duración de 300 segundos, y se realizan 100 repeticiones por cada configuración de parámetros. La generación de vehículos es constante a una tasa de $60 \frac{veh}{seg}$. La cantidad de vehículos en el sistema se controla con la distancia mínima que debe haber entre el nuevo vehículo a ser insertado en la vía y el más cercano de dicha vía. Un aspecto importante a considerar es que las colisiones sólo son reportadas por los vehículos involucrados en dichas colisiones, el resto de los vehículos reportan terminal oculta, ya que lo único que saben es que recibieron un paquete y antes de completar la recepción recibieron otro más, por lo que no pueden saber si fue colisión o terminal oculta, en este trabajo se consideran como terminal oculta.

6.4. Parámetros del sistema

Las simulaciones se realizan con todos los parámetros para la comunicación que indica IEEE 802.11p, para la parte de movilidad de los vehículos en los escenarios las simulaciones cuentan con los parámetros en la Tabla 6.1.

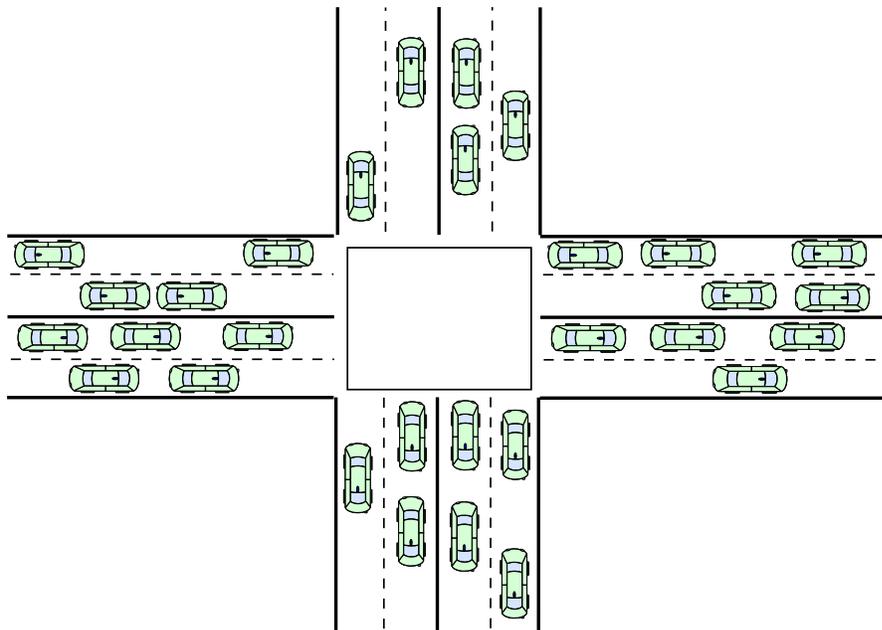


FIGURA 6.2: Escenario de una intersección.

Parámetro	E. intersección	E. dos vías
Velocidad mínima	$8 \frac{m}{s}$	$8 \frac{m}{s}$
Velocidad máxima	$13 \frac{m}{s}$	$25 \frac{m}{s}$
Equipados con dispositivo inalámbrico	Todos	Todos
Número de vehículos (N)	25, 50, 90, 150	25, 50, 90, 150

TABLA 6.1: Parámetros de los escenarios.

Para poder tener resultados significativos, también se varían la ventana de contención (W) para los valores $W = 16, 128$ y el tamaño del paquete transmitido (L) para los valores $L = 300, 600, 1400$ bytes.

6.5. Resultados

De las simulaciones realizadas, podemos observar la tendencia en las pérdidas de paquetes para los sistemas WAVE. En la Figura 6.3, observamos el porcentaje de pérdidas para el escenario de dos vías con la ventana de contención $W = 16, 128$ y tamaños de paquete $L = 300, 600$ y 1400 . Es notable que con una ventana de contención más grande, se tienen menos pérdidas, de manera similar ocurre para el escenario de la intersección

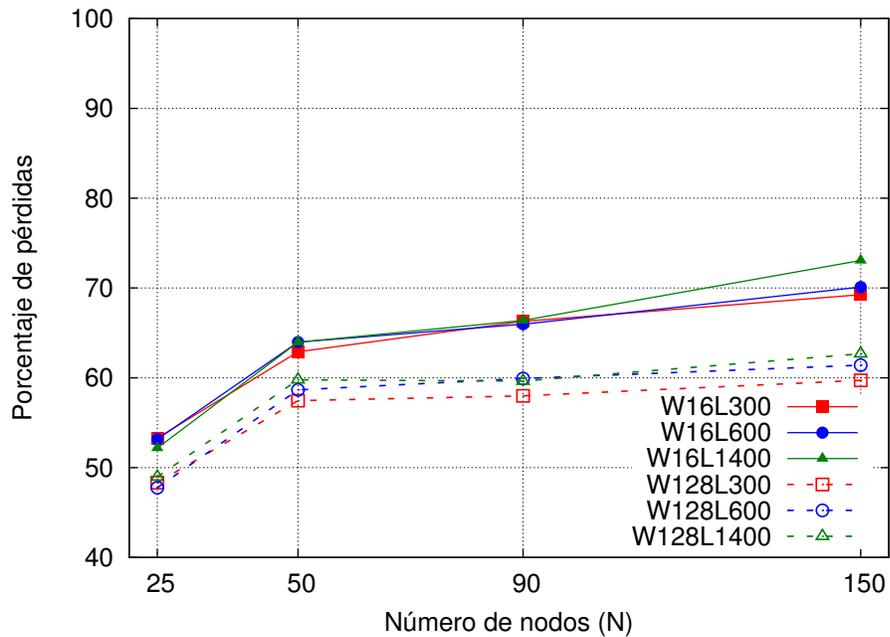


FIGURA 6.3: Porcentaje de pérdidas contra número de nodos para el escenario de dos vías.

en la Figura 6.4, aunque en éste observamos que hay un porcentaje de pérdidas mayor al ocurrido en el escenario de dos vías, ya que en el escenario de la intersección los vehículos tienen una separación menor y hay más vehículos en el rango de alcance de transmisión. Como habíamos visto, en la Figura 6.4, hay una reducción en el porcentaje de pérdidas al incrementar la ventana de contención a 128, la razón de este comportamiento es debido a que los dispositivos inalámbricos pueden elegir un *backoff* más grande, por lo que se reducen las colisiones y las terminales ocultas, aunque aumentan las pérdidas por cambio de canal. Por otro lado, observamos que el tamaño de paquete también provoca una variación en la cantidad de paquetes perdidos, esto se justifica porque al tener más bytes para transmitir, toma más tiempo completar la transmisión, lo que puede ocasionar pérdidas por cambio de canal o por terminal oculta, pues mientras más dure la transmisión del paquete, es más probable que otro vehículo que no detecta el medio ocupado transmita y se provoque la terminal oculta o se agote el tiempo para transmitir y se pierda el paquete debido al cambio de canal.

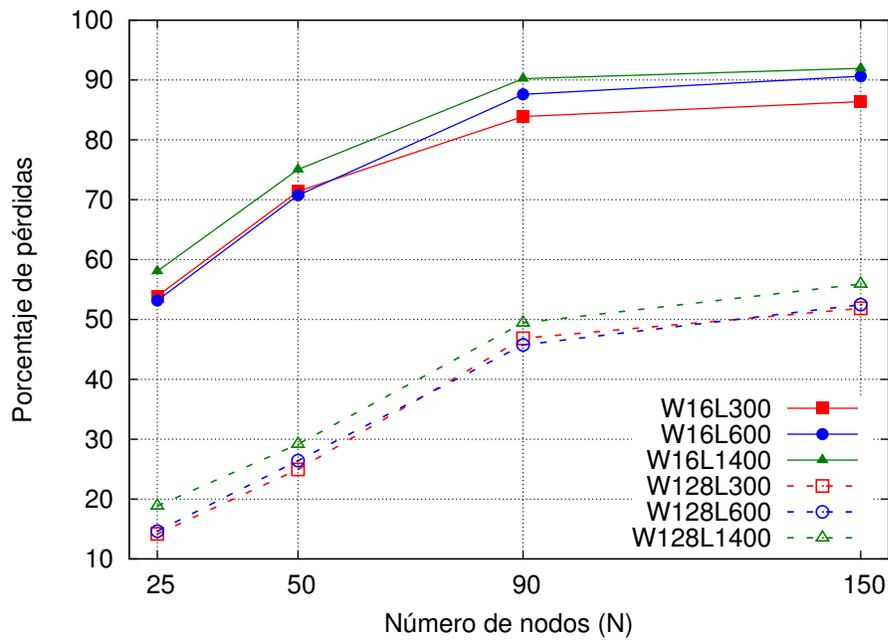


FIGURA 6.4: Porcentaje de pérdidas contra número de nodos para el escenario de la intersección.

En el escenario de la intersección, que es donde tenemos un porcentaje mayor de pérdidas, observamos en la Figura 6.5a el porcentaje de cada tipo de pérdida para la ventana de contención $W = 16$ y tamaño de paquete $L = 300$. La mayoría de las pérdidas vemos que son debidas a la terminal oculta, que ocurre cuando dos vehículos que se

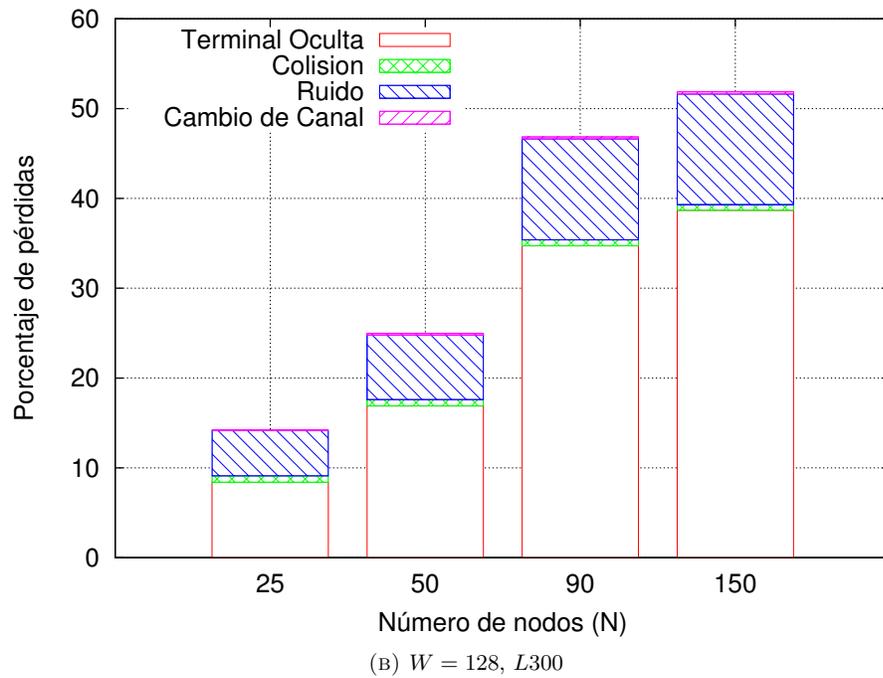
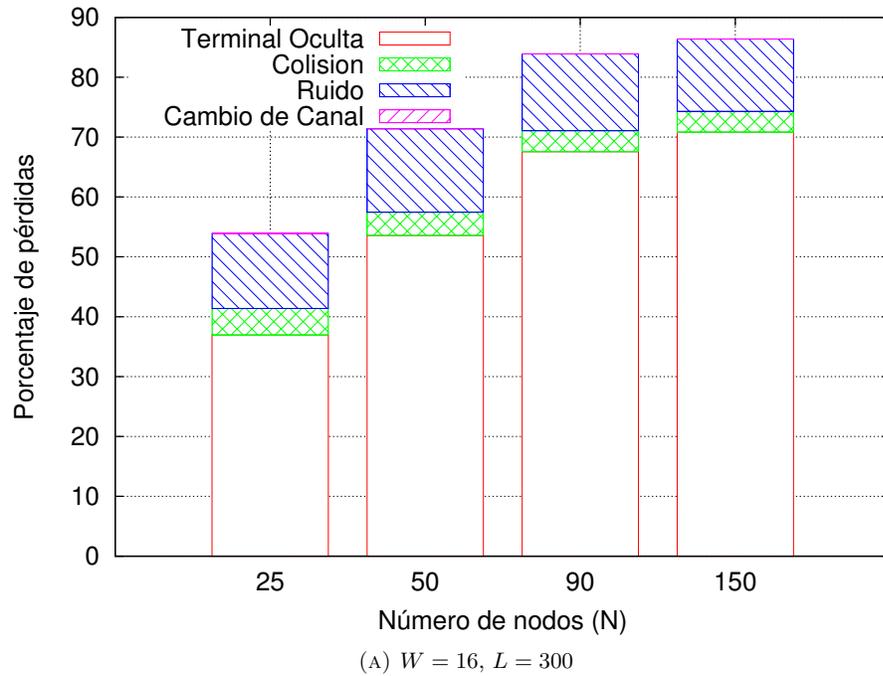


FIGURA 6.5: Porcentajes para cada tipo de pérdida con $W = 16, 128$ y $L = 300$

encuentran fuera del rango de transmisión envían sus paquetes, los cuales se interfieren en los nodos cercanos a ambos transmisores. El siguiente tipo de pérdidas que mayor porcentaje agregan al total es el ruido, luego las colisiones y muy poco (prácticamente imperceptibles en la gráfica) las pérdidas debido a que expira el intervalo del canal de

control. De estos resultados, podemos saber por qué hay más pérdidas para el escenario de la intersección con respecto al escenario de dos vías, pues en este último los vehículos están más separados, por lo que no hay tantas colisiones ni vehículos que perciban la terminal oculta. En la Figura 6.5b, podemos observar las reducciones de las colisiones y la terminal oculta, y el incremento de las pérdidas por cambio de canal, las cuales a diferencia de la Figura 6.5a se pueden apreciar un poco más; sin embargo, a pesar de que las pérdidas por cambio de canal se incrementan, se obtiene un mayor beneficio pues se reducen bastante las pérdidas por terminal oculta y por colisiones, en comparación con el aumento de las pérdidas por cambio de canal.

Los resultados hasta este punto, nos muestran una similitud con los resultados reportados por Campolo. El porcentaje de pérdidas obtenido del escenario de la intersección, mostrado en la Figura 6.4, tiene un comportamiento semejante al esperado en las probabilidades de pérdidas de la Figura 3.2. En ambos casos podemos inferir que al aumentar el número de vehículos, o al aumentar el tamaño del paquete, se aumentan las pérdidas, y al aumentar el tamaño de la ventana de contención se disminuyen las pérdidas. A pesar de la similitud en el comportamiento, las pérdidas esperadas con las probabilidades de Campolo no corresponden con el porcentaje de pérdidas obtenidos en este trabajo. Especialmente las pérdidas por cambio de canal, las cuales no se incrementan tan rápidamente como se espera del modelo de Campolo.

Lo más notable de los resultados anteriores, es el hecho de que al incrementar la ventana de contención, se reducen las pérdidas, entonces, para saber si este comportamiento se conserva hasta la ventana de contención máxima del IEEE 802.11p, que es $W = 1024$, se realizaron más simulaciones para los valores $W = 512, 1024$ y tamaños de paquetes $L = 300, 600$ y 1400 . En la Figura 6.6 se encuentran los resultados de las simulaciones de las cuatro ventanas de contención, y podemos apreciar fácilmente que el comportamiento visto en la Figura 6.4 se conserva, mientras más grande sea la ventana de contención menos pérdidas de paquetes tendremos, reduciendo en gran medida las pérdidas.

El mismo comportamiento lo observamos cuando analizamos el porcentaje que cada tipo de pérdida aporta al total, en la Figura 6.6 podemos notar como se reducen las pérdidas por terminal oculta y por colisión al aumentar la ventana de contención, y por otro lado, las pérdidas por cambio de canal van incrementando, aunque estas de manera más lenta en comparación a la reducción de las colisiones y las terminales ocultas.

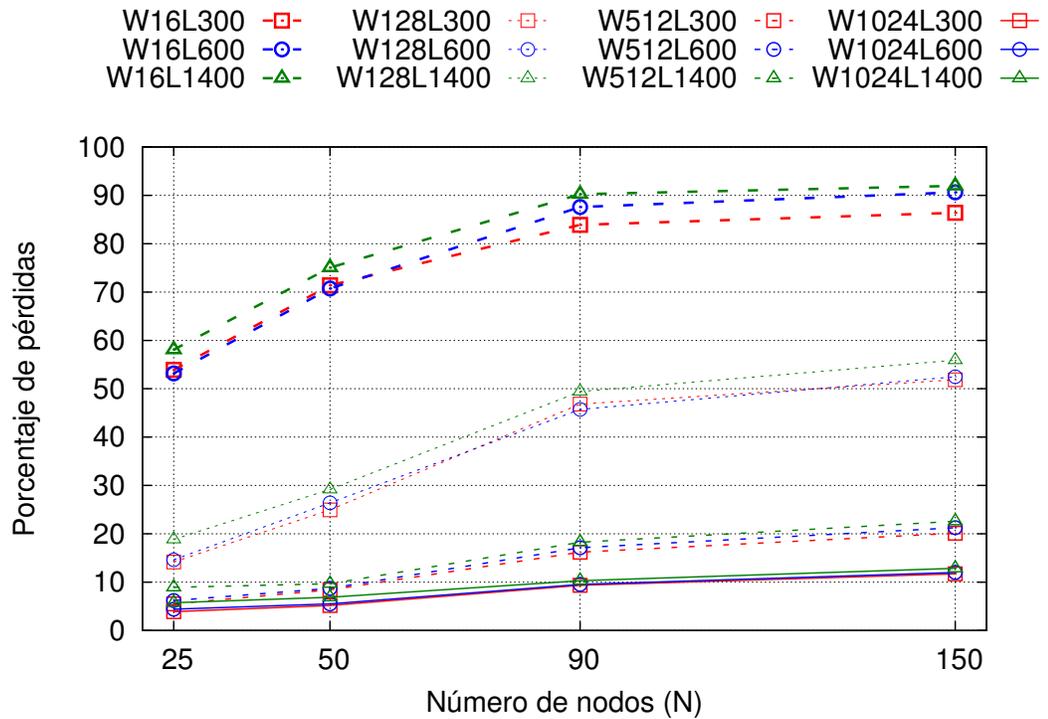
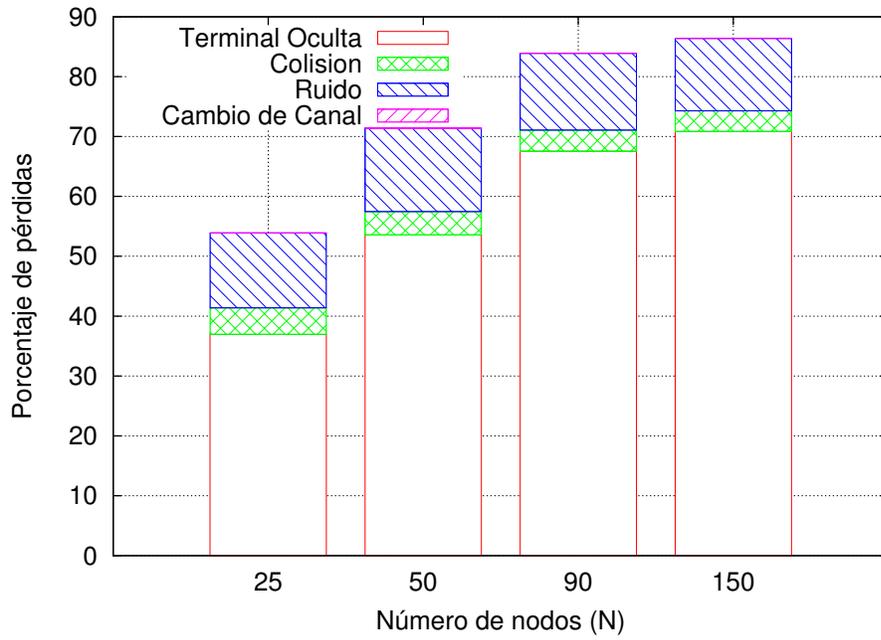
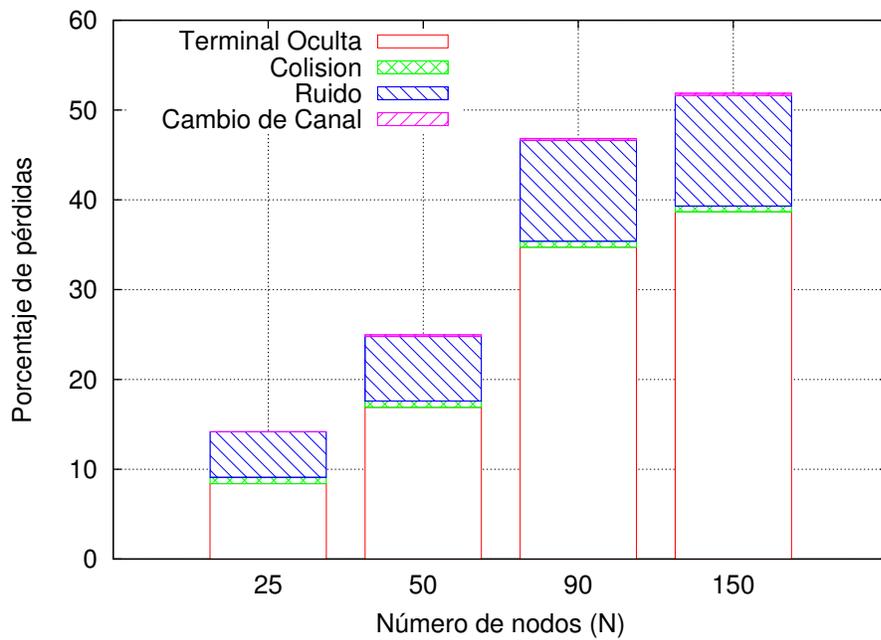


FIGURA 6.6: Porcentaje de pérdidas contra número de nodos para el escenario de la intersección, con $W = 16, 128, 512, 1024$.

Este análisis no había sido reportado en trabajos relacionados. De ahí la motivación para realizar un análisis más completo del IEEE 802.11p. Los resultados nos sugieren un mejor desempeño del sistema al tener una ventana de contención más grande. Existe un compromiso al incrementar la ventana de contención, por un lado, se incrementan las pérdidas por cambio de canal, y por otro, se puede también experimentar una mayor retardo en la transmisión de los paquetes. A pesar del compromiso, el incremento de las pérdidas por cambio de canal, no afecta en gran medida, notamos que a pesar de dicho incremento el beneficio es mayor. El retardo en la entrega de paquetes no es tan importante en el canal de control, pues dada la naturaleza de los paquetes que se transmiten en este canal, el interés principal es que los paquetes lleguen a su destino, que no se pierdan, aún si se tuvieran mensajes de seguridad, la prioridad de estos haría que se transmitieran antes que el resto por lo que no se verían tan afectados por los retardos.



(A) $W = 16, L = 300$



(B) $W = 128, L = 300$

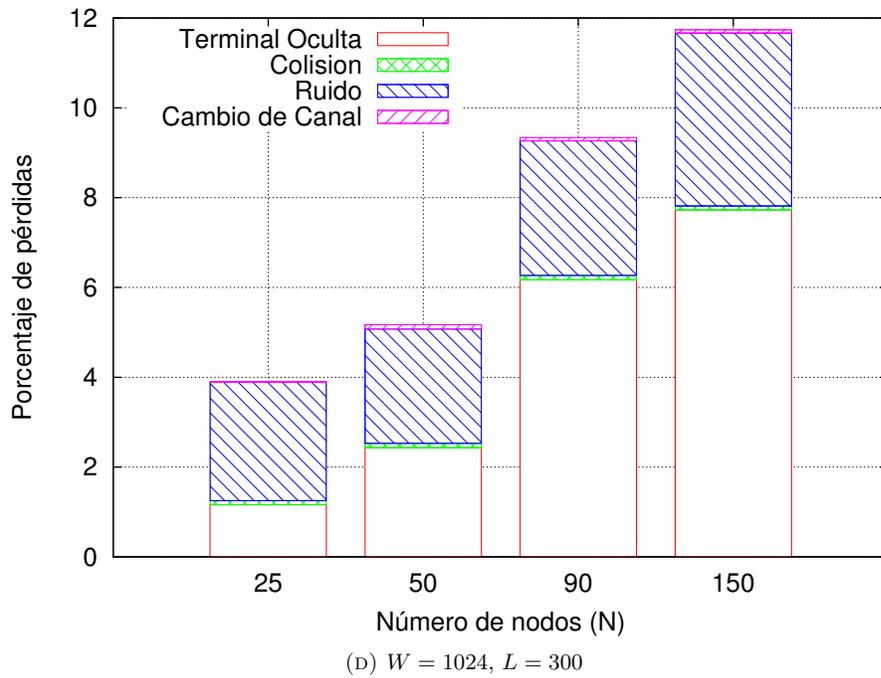
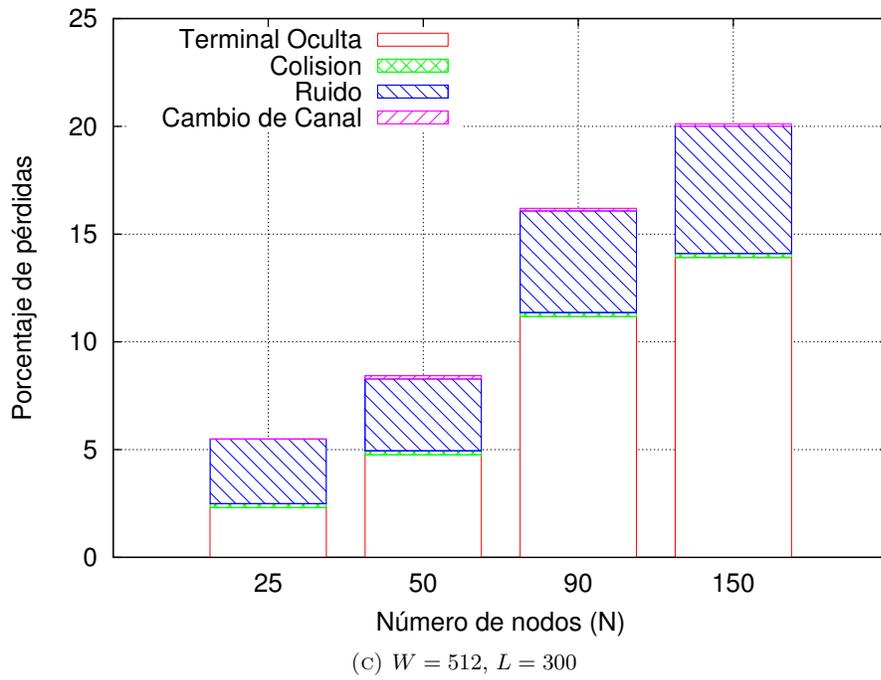


FIGURA 6.6: Porcentajes para cada tipo de pérdida con $W = 16, 128, 512$ y 1024 y $L = 300$

Capítulo 7

Conclusiones

En este trabajo, hemos realizado un análisis del estándar para las redes vehiculares IEEE 802.11p sobre el canal de control, con el fin de comprobar el modelo analítico de Claudia Campolo et al., así como de encontrar los límites del uso del canal, en términos del porcentaje de pérdidas.

Claudia Campolo realizó sus simulaciones sobre un escenario de dos vías como el presentado en este trabajo, sin embargo ella toma en cuenta que todos los vehículos están en línea de vista, es decir, no hay terminal oculta, y comparando sus resultados con los obtenidos en este trabajo, es decir los de la Figura 3.2 con los de la Figura 6.3, notamos un porcentaje de pérdidas menor al esperado con las probabilidades de pérdida de Claudia Campolo, pero si comparamos sus resultados con los nuestros en la intersección, podemos notar una mejor correspondencia de la probabilidad de pérdidas de Claudia Campolo con respecto al porcentaje de pérdidas de nuestras simulaciones. Como habíamos comentado en la Sección 6.5, en el escenario de la intersección los vehículos se encuentran más cercanos, lo que se apega más con la consideración de Claudia Campolo de que todos los vehículos se encuentran en línea de vista, razón por la cual los resultados son más parecidos. Sin embargo, en nuestras simulaciones notamos que la mayor parte de pérdidas son debido a la terminal oculta, aspecto que no considera Claudia Campolo en su trabajo, además, encontramos que el porcentaje de pérdidas que aportan los eventos de cambio de canal, es muy bajo, es lo que menos aporta al total de pérdidas, lo que contrasta con los resultados de Claudia Campolo, donde podemos observar que mientras más se incrementa la ventana de contención, se incrementa en gran medida la

probabilidad de pérdidas. El comportamiento es similar al observado en nuestras simulaciones, pero a menor escala, no observamos un incremento tan grande en el porcentaje de pérdidas.

Los resultados nos muestran que mientras más grande sea la ventana de contención menos pérdidas tendremos, lo cual es importante para el canal de control, debido a la naturaleza de los mensajes que se envían sobre dicho canal, es importante que los mensajes lleguen, aún cuando el incremento en la ventana de contención implique un retardo mayor en la entrega de los paquetes, es indispensable que los mensajes transmitidos en el canal de control lleguen. Podemos entonces, utilizar ventanas de contención grandes para el canal de control, o bien adaptar dinámicamente la ventana de contención, como función de la cantidad de vehículos.

7.1. Trabajo futuro

Con los resultados obtenidos, surgen distintas vertientes para la continuación de este trabajo. Por un lado, extender el modelo analítico de Claudia Campolo, para presentar un modelo que se apege más a las condiciones que presentan las redes vehiculares. Si bien no es trivial agregar la terminal oculta en un modelo analítico, esta afecta en gran medida a las redes vehiculares y es importante considerarla. Por otro lado, agregar elementos a los escenarios de simulación que los hagan más realistas. Por ejemplo, la trayectoria múltiple ocasionada por los objetos cercanos a los vehículos es un factor interesante para ser analizado, para conocer el impacto que tiene en el desempeño de las redes vehiculares. En un contexto complementario, estamos interesados en estudiar los mecanismos para la difusión de la información en redes vehiculares, con el fin de optimizar el proceso de difusión, pues este es crucial para el desempeño de las redes vehiculares.

Referencias

- [1] “IEEE 802.11p: Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments,” July 2010.
- [2] L. Wei, X. Xiao, Y. Chen, M. Xu, and H. Fan, “Power-control-based Broadcast Scheme for Emergency Messages in VANETs,” in *11th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, pp. 274–279, October 2011.
- [3] C. Campolo, Y. Koucheryavy, A. Molinaro, and A. Vinel, “Characterizing Broadcast Packet Losses in IEEE 802.11p/WAVE Vehicular Networks,” in *IEEE 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 735–739, September 2011.
- [4] C. F. Mecklenbrauker, A. F. Molisch, J. Karedal, F. Tufvesson, A. Paier, L. Bernardo, T. Zemen, O. Klemp, and N. Czink, “Vehicular Channel Characterization and Its Implications for Wireless System Design and Performance,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, pp. 1189–1212, July 2011.
- [5] I. Sen and D. W. Matolak, “Vehicle-Vehicle channel models for the 5-GHz band,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 9, pp. 235–245, June 2008.
- [6] L. Reichardt, C. Sturm, and T. Zwick, “Performance evaluation of SISO, SIMO and MIMO antenna systems for car-to-car communications in urban environments,” in *9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications (ITST)*, pp. 51–56, October 2009.

-
- [7] H. Asplund, A. A. Glazunov, A. F. Molisch, K. I. Pedersen, and M. Steinbauer, "The COST 259 Directional Channel Model-Part II: Macrocells," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, pp. 3434–3450, December 2006.
- [8] L. Correia, *Mobile Broadband Multimedia Networks*. Academic Press, 2006.
- [9] G. Calcev, D. Chizhik, B. Goransson, S. Howard, H. Huang, A. Kogiantis, A. F. Molisch, A. L. Moustakas, D. Reed, , and H. Xu, "A wideband spatial channel model for system-wide simulations," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, pp. 389–403, March 2007.
- [10] 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, and T. Rautiainen, "WINNER II Channel Models," tech. rep., Version 1.1, 2008.
- [11] J. Kunisch and J. Pamp, "Wideband Car-to-Car Radio Channel Measurements and Model at 5.9 GHz," in *IEEE 68th Vehicular Technology Conference (VTC 2008-Fall)*, pp. 1–5, September 2008.
- [12] A. Paier, L. Bernado, J. Karedal, O. Klemp, and A. Kwoczek, "Overview of Vehicle-to-Vehicle Radio Channel Measurements for Collision Avoidance Applications," in *IEEE 71th Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring)*, pp. 1–5, May 2010.
- [13] R. Schmidt, T. Leinmuller, E. Schoch, F. Kargl, and G. Schafer, "Exploration of adaptive beaconing for efficient intervehicle safety communication," *IEEE Network*, vol. 24, pp. 14–19, February 2010.
- [14] M. Torrent-Moreno, J. Mittag, P. Santi, and H. Hartenstein, "Vehicle-to-Vehicle Communication: Fair Transmit Power Control for Safety-Critical Information," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, pp. 3684–3703, September 2009.
- [15] C. Sommer, O. K. Tonguz, and F. Dressler, "Traffic information systems: efficient message dissemination via adaptive beaconing," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, pp. 173–179, May 2011.

-
- [16] X. Ma and X. Chen, "Delay and Broadcast Reception Rates of Highway Safety Applications in Vehicular Ad Hoc Networks," in *2007 Mobile Networking for Vehicular Environments*, pp. 85–90, May 2007.
- [17] E. M. van Eenennaam, W. K. Wolterink, G. Karagiannis, and G. J. Heijenk, "Exploring the solution space of beaconing in VANETs," in *IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, pp. 1–8, October 2009.
- [18] G. Badawy, J. Mistic, T. Todd, and D. Zhao, "Performance modeling of safety message delivery in vehicular ad hoc networks," in *IEEE 6th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pp. 188–195, October 2010.
- [19] S. Eichler, "Performance Evaluation of the IEEE 802.11p WAVE Communication Standard," in *IEEE 66th Vehicular Technology Conference (VTC 2007-Fall)*, pp. 2199–2203, September 2007.
- [20] C. Campolo, Y. Koucheryavy, A. Molinaro, and A. Vinel, "Modeling Broadcasting in IEEE 802.11p/WAVE Vehicular Networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 15, pp. 199–201, February 2011.
- [21] C. Campolo, A. Molinaro, A. Vinel, and Y. Zhang, "Modeling Prioritized Broadcasting in Multichannel Vehicular Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, pp. 687–701, February 2012.
- [22] H.-C. Jang and W.-C. Feng, "Network Status Detection-Based Dynamic Adaptation of Contention Window in IEEE 802.11p," in *IEEE 71st Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring)*, pp. 1–5, May 2010.
- [23] C. Chrysostomou, C. Djouvas, and L. Lambrinos, "Dynamically adjusting the min-max contention window for providing quality of service in vehicular networks," in *The 11th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net)*, pp. 16–23, June 2012.
- [24] Y. Wang, A. Ahmed, B. Krishnamachari, and K. Psounis, "Dynamically adjusting the min-max contention window for providing quality of service in vehicular networks," in *The 11th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net)*, pp. 16–23, June 2012.

-
- [25] J. Harri, F. Filali, and C. Bonnet, “Mobility models for vehicular ad hoc networks: a survey and taxonomy,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 11, pp. 19–41, December 2009.
- [26] Paramics, “Microscopic Traffic Simulation, <http://www.paramics-online.com>.”
- [27] CORSIM, “Microscopic Traffic Simulation Model, <http://www-mctrans.ce.ufl.edu/featured/TSIS/Version5/corsim.htm>.”
- [28] PTV Group, “VISSIM, http://www.english.ptv.de/cgi-bin/traffic/traf_vissim.pl.”
- [29] TRANSIMS, “TRansportation ANalysis SIMulation System, <http://code.google.com/p/transims/>.”
- [30] SUMO, “Simulation of Urban Mobility, <http://sumo.sourceforge.net>.”
- [31] M. Treiber, A. Hennecke, and D. Helbing, “Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations,” *Physical Review E*, vol. 62, pp. 1805–1824, August 2000.
- [32] Network Simulator 3 (NS-3), “Discrete Event Network Simulator, <http://www.nsnam.org>.”
- [33] H. Arbabi and M. C. Weigle, “Highway mobility and vehicular ad-hoc networks in ns-3,” in *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference (WSC)*, pp. 2991–3003, December 2010.



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00031

Matrícula: 2113802450

ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE
PERDIDAS DE PAQUETES DE
DIFUSION EN REDES
VEHICULARES IEEE 802.11p/WAVE

En México, D.F., se presentaron a las 11:00 horas del día 19 del mes de agosto del año 2013 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DR. ENRIQUE STEVENS NAVARRO
DRA. GRACIELA ROMAN ALONSO
DR. VICTOR MANUEL RAMOS RAMOS



Bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretario el último, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS (CIENCIAS Y TECNOLOGIAS DE LA INFORMACION)

DE: SALVADOR GONZALEZ ARELLANO

SALVADOR GONZALEZ ARELLANO
ALUMNO

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

A probar

REVISÓ

LIC. JULIO CESAR DE LARA ISASSI
DIRECTOR DE SISTEMAS ESCOLARES

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

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBI

DR. JOSE ANTONIO DE LOS REYES
HEREDIA

PRESIDENTE

DR. ENRIQUE STEVENS NAVARRO

VOCAL

DRA. GRACIELA ROMAN ALONSO

SECRETARIO

DR. VICTOR MANUEL RAMOS RAMOS