



**UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**  
**DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

“Evaluación de los protocolos IEEE 802.11p/1609.4 en entornos VANETs usando un modelo de movilidad realista”

**Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Telemática**

**Maestría de Telemática**

Autor: Ing. José Ariel Casanova Rodríguez  
DTVC, ETECSA, jose.casanova@etecsa.cu

Tutor: Dr. C. Samuel Montejo Sánchez  
FIE, UCLV, montejo@uclv.edu.cu

Consultante: MSc. Sandy Bolufé Aguila  
FIE, UCLV, sandyb@uclv.edu.cu

**Santa Clara, Cuba, 2016**

# RESUMEN

Los protocolos IEEE 802.11p/1609.4 definen el funcionamiento de la capa MAC y PHY en la arquitectura de red acceso inalámbrico en entornos vehiculares (WAVE). Esta tecnología es clave para el correcto funcionamiento de las aplicaciones de seguridad vial, que tienen como objetivo disminuir el número de muertes humanas debido a accidentes automovilísticos. En este trabajo se usa el simulador de comunicaciones vehiculares Veins, que integra el simulador de red OMNeT ++ y el simulador de tráfico SUMO, para evaluar el desempeño de los protocolos IEEE 802.11p/1609.4 en entornos VANETs, usando un modelo de movilidad realista. Los resultados de los experimentos muestran que: 1) en escenarios con alta densidad de vehículos, las categorías de acceso (ACs) de IEEE 802.11p que tienen las ventanas de contención más pequeñas, pueden producir un incremento en el número de colisiones de paquetes, disminuyendo la probabilidad de recepción exitosa, lo que atenta contra el correcto desempeño de las aplicaciones de seguridad vial, 2) el mecanismo de conmutación sincrónica de canal definido por IEEE 1609.4 conduce a un mayor número de expiraciones simultáneas de los contadores de backoff, lo que atenta contra la correcta operación de las aplicaciones vehiculares. La evaluación de los protocolos IEEE 802.11p/IEEE 1609.4 en escenarios realistas permitió corroborar su aplicabilidad en entornos VANETs.

**Palabras Clave:** IEEE 802.11p, IEEE 1609.4, WAVE, Veins, ventana de contención, conmutación sincrónica de canal, aplicaciones de seguridad vial.

# PRÓLOGO

Este trabajo fue desarrollado en la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas (UCLV), como parte de la culminación de estudios de la Maestría en Telemática.

## AGRADECIMIENTOS

*A mi tutor Samuel Montejo, sabias sugerencias vinieron siempre de su parte.*

*A mi amigo Sandy, su contribución en el trabajo es invaluable. Muchas gracias por todo este tiempo que sin pensarlo le dedicaste a este proyecto.*

*Al Centro de Capacitación Regional, en especial a Rubersy Ramos García su ayuda fue fundamental para lograr los resultados de este trabajo.*

*A los profesores de la maestría en Telemática, por las clases impartidas durante esta etapa.*

## DEDICATORIA

*A mi familia y amigos, que me apoyaron y ayudaron en esta etapa de mi vida.*

## EXORDIO

*“Siempre es el momento apropiado para hacer lo que es correcto”.*

*Martin Luther King. Jr.*

# ÍNDICE

RESUMEN.....	i
PRÓLOGO.....	ii
ÍNDICE.....	iii
Lista de Figuras.....	v
Lista de Tablas.....	vi
Lista de Acrónimos.....	vii
INTRODUCCIÓN.....	1
1. Acceso inalámbrico en entornos vehiculares (WAVE).....	6
1.1 Dispositivos.....	6
1.2 Espectro designado.....	7
1.3 Arquitectura de red.....	8
1.3.1 IEEE 802.11p - Capa MAC y PHY.....	10
1.3.2 IEEE 1609.4 - Operación multicanal.....	13
1.3.3 IEEE 1609.3 - Capa de servicios de red.....	14
1.3.4 IEEE 1609.2 - Servicios de seguridad.....	16
1.3.5 IEEE 1609.1 - Gestor de recursos.....	16
1.4 Conclusiones parciales.....	17
2. Modelo de movilidad, herramientas y escenarios de simulación VANETs.....	18
2.1 Desafíos de simulación.....	18
2.2 Modelo de movilidad realista.....	20
2.2.1 Simulador de tráfico.....	23
2.2.2 Validación.....	23
2.3 Herramientas de simulación.....	24
2.3.1 SUMO.....	24
2.3.2 MOVE.....	24
2.3.3 OMNeT++.....	24
2.3.4 Veins.....	25
2.4 Escenarios de simulación.....	25

2.2.3	Entorno urbano.....	25
2.2.4	Entorno autopista .....	27
2.5	Parámetros de simulación.....	28
2.6	Métricas de desempeño .....	30
2.7	Conclusiones parciales .....	30
3.	Desempeño de los protocolos IEEE 802.11p/ 1609.4 en entornos VANETs .....	31
3.1	Tamaño de la ventana de contención (CW) .....	31
3.2	Conmutación sincrónica de canal (1609.4) .....	39
3.3	Tamaño de los mensajes de difusión de un salto.....	42
3.4	Conclusiones parciales .....	46
	CONCLUSIONES .....	47
	RECOMENDACIONES .....	49
	BIBLIOGRAFÍA.....	50
	ANEXOS.....	54

# Lista de Figuras

<b>Figura 1.1:</b> Tecnología WAVE: desplazamiento de una OBU entre las zonas de comunicación de dos RSUs. ....	6
<b>Figura 1.2:</b> Distribución de WBSS a lo largo de una autopista.....	7
<b>Figura 1.3:</b> Conjunto de canales definidos para los sistemas WAVE. ....	8
<b>Figura 1.4:</b> Arquitectura de red acceso inalámbrico en entornos vehiculares (WAVE). ....	9
<b>Figura 1.5:</b> Relación entre la operación multicanal y priorización del tráfico con distintas categorías de acceso (ACs) en la capa MAC de IEEE 802.11p. ....	11
<b>Figura 1.6:</b> Funcionamiento de CSMA/CA en el modo DCF según la categoría de acceso para IEEE 802.11p.....	12
<b>Figura 1.7:</b> Retardo de envío definido por IEEE 802.11p para las categorías de acceso (ACs). ....	12
<b>Figura 1.8:</b> Intervalos de sincronismo, guarda, CCH y SCH utilizados en la operación multicanal del protocolo IEEE 1609.4.....	14
<b>Figura 2.1:</b> Mapa conceptual de un modelo de movilidad realista [15]. ....	22
<b>Figura 2.2:</b> Porción de mapa real de la ciudad de Los Ángeles visto desde el sitio OpenStreetMap....	26
<b>Figura 2.3:</b> Porción de mapa real de la ciudad Los Ángeles visto desde SUMO.....	26
<b>Figura 2.4:</b> Entorno de autopista Engelskirchen visto desde el sitio OpenStreetMap.....	27
<b>Figura 2.5:</b> Entorno de autopista Engelskirchen visto desde SUMO. ....	28
<b>Figura 3.1:</b> Número de colisiones de paquetes (NC) en función de la densidad de nodos para el entorno urbano Los Ángeles, a) 1 beacon/s, b) 5 beacon/s, c) 10 beacon/s. ....	31
<b>Figura 3.2:</b> Probabilidad de recepción exitosa ( $P_r$ ) en función de la densidad de nodos para el entorno urbano Los Ángeles, a) 1 beacon/s, b) 5 beacon/s, c) 10 beacon/s. ....	33
<b>Figura 3.3:</b> Demora de extremo a extremo (DEE) en función de la densidad de nodos para el entorno urbano Los Ángeles, a) 1 beacon/s, b) 5 beacon/s, c) 10 beacon/s. ....	34
<b>Figura 3.4:</b> Error de posición máximo percibido (EPM) en función de la densidad de nodos para el entorno urbano Los Ángeles, a) 1 beacon/s, b) 5 beacon/s, c) 10 beacon/s. ....	35
<b>Figura 3.5:</b> Número de colisiones de paquetes (NC) en función de la velocidad de los nodos para el entorno de autopista Engelskirchen, a) 1 beacon/s, b) 5 beacon/s, c) 10 beacon/s. ....	36
<b>Figura 3.6:</b> Probabilidad de recepción exitosa ( $P_r$ ) en función de la velocidad de los nodos para el entorno de autopista Engelskirchen, a) 1 beacon/s, b) 5 beacon/s, c) 10 beacon/s. ....	37
<b>Figura 3.7:</b> Demora de extremo a extremo (DEE) en función de la velocidad de los nodos para el entorno de autopista Engelskirchen, a) 1 beacon/s, b) 5 beacon/s, c) 10 beacon/s. ....	38

<b>Figura 3.8:</b> Error de posición máximo percibido (EPM) en función de la velocidad de los nodos para el entorno de autopista Engelskirchen, a) 1 beacon/s, b) 5 beacon/s, c) 10 beacon/s. ....	39
<b>Figura 3.9:</b> Entorno urbano Los Ángeles (60 veh/Km <sup>2</sup> , beacon de 512 bytes), a) Probabilidad de recepción exitosa (Pr), b) Número de colisiones (NC), c) Demora de extremo a extremo (DEE), d) Error de posición máximo percibido (EPM <sub>real</sub> ). ....	40
<b>Figura 3.10:</b> Entorno de autopista Engelskirchen (150 Km/h, beacon de 512 bytes), a) Probabilidad de recepción exitosa (Pr), b) Número de colisiones (NC), c) Demora de extremo a extremo (DEE), d) Error de posición máximo percibido (EPM <sub>real</sub> ). ....	41
<b>Figura 3.11:</b> Número de colisiones (NC) de paquetes en función del tamaño de beacon en el entorno urbano Los Ángeles, a) 1 beacon/s, b) 10 beacon/s. ....	42
<b>Figura 3.12:</b> Probabilidad de recepción exitosa (Pr) en función del tamaño de beacon en el entorno urbano Los Ángeles, a) 1 beacon/s, b) 10 beacon/s. ....	42
<b>Figura 3.13:</b> Demora de extremo a extremo (DEE) en función del tamaño de beacon en el entorno urbano Los Ángeles, a) 1 beacon/s, b) 10 beacon/s. ....	43
<b>Figura 3.14:</b> Error de posición máximo percibido (EPM <sub>real</sub> ) en función del tamaño de beacon en el entorno urbano Los Ángeles, a) 1 beacon/s, b) 10 beacon/s. ....	43
<b>Figura 3.15:</b> Número de colisiones (NC) de paquetes en función del tamaño de beacon en el entorno de autopista Engelskirchen, a) 1 beacon/s, b) 10 beacon/s. ....	44
<b>Figura 3.16:</b> Probabilidad de recepción exitosa (Pr) en función del tamaño de beacon en el entorno de autopista Engelskirchen, a) 1 beacon/s, b) 10 beacon/s. ....	44
<b>Figura 3.17:</b> Demora de extremo a extremo (DEE) en función del tamaño de beacon en el entorno de autopista Engelskirchen, a) 1 beacon/s, b) 10 beacon/s. ....	45
<b>Figura 3.18:</b> Error de posición máximo percibido (EPM <sub>real</sub> ) en función del tamaño de beacon en el entorno de autopista Engelskirchen, a) 1 beacon/s, b) 10 beacon/s. ....	45

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1.1</b> Lista de estándares WAVE .....	9
<b>Tabla 1.2</b> Parámetros de contención para las categorías de acceso (ACs) [9] .....	11
<b>Tabla 1.3</b> Parámetros del protocolo IEEE 802.11p [29] .....	13
<b>Tabla 1.4</b> Variantes de transmisión definidas por IEEE 802.11 en canales de 10 MHz [30].....	13
<b>Tabla 2.1</b> Parámetros del entorno urbano Los Ángeles.....	27
<b>Tabla 2.2</b> Parámetros del entorno de autopista Engelskirchen.....	28
<b>Tabla 2.3</b> Parámetros utilizados en las simulaciones .....	29

# Lista de Acrónimos

**ACs**, Access Categories  
**AIFS**, Arbitration Interframe Space  
**C2C-CC**, Car 2 Car Communication Consortium  
**CACC**, Cooperative Adaptive Cruise Control  
**CAMs**, Cooperative Awareness Messages  
**CCH**, Control Channel  
**CSMA/CA**, Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance  
**CW**, Contention Window  
**DCF**, Distributed Coordination Function  
**DENMs**, Decentralized Environmental Notification Messages  
**DSRC**, Dedicated Short Range Communications  
**EDCA**, Enhanced Distributed Channel Access  
**FCC**, Federal Communications Commission  
**FIFO**, First In First Out  
**GPS**, Global Positioning System  
**I2V**, Infrastructure-to-Vehicle  
**IEEE**, Institute of Electrical and Electronics Engineers  
**IETF**, Internet Engineering Task Force  
**ISO**, International Organization for Standardization  
**ITS**, Intelligent Transportation Systems  
**ITS**, Intelligent Transportation Systems  
**ITSA**, Intelligent Transportation Society of America  
**IVHS**, Intelligent Vehicle Highway Systems  
**LLC**, Logical Link Control  
**MAC**, Medium Access Control  
**MANETs**, Mobile Ad-hoc Networks  
**MIB**, Management Information Base  
**MOVE**, MObility model generator for VEhicular networks  
**NITSA**, National Intelligent Transportation Systems Architecture  
**OBU**, On-Board Unit  
**OFDM**, Orthogonal Frequency - Division Multiplexing  
**OMNeT++**, Objective Modular Network Testbed in C++  
**OSI**, Open Systems Interconnection  
**PATH**, Partners for Advanced Transit and Highways  
**PHY**, Physical Layer  
**PSID**, Provider Service Identifier  
**QoS**, Quality of Service  
**RCP**, Resource Command Processor  
**RCPI**, Received Channel Power Indicator  
**RFC**, Request For Comments  
**RM**, Resource Manager  
**RSU**, Road-Side Unit  
**SCHs**, Service Channels  
**SNAP**, Sub-Network Access Protocol  
**SUMO**, Simulation of Urban MObility  
**TCP**, Transmission Control Protocol  
**U.S. DoT**, United States Department of Transportation  
**UDP**, User Datagram Protocol  
**UTC**, Coordinated Universal Time

**V2I**, Vehicle-to-Infrastructure  
**V2V**, Vehicle-to-Vehicle  
**VANETs**, Vehicular Ad-hoc Networks  
**Veins**, Vehicles in Network Simulation  
**WAVE**, Wireless Access in Vehicular Environments  
**WBSS**, WAVE Basic Service Set  
**WME**, WAVE Management Entity  
**WSMP**, Wave Short Messages Protocol

# INTRODUCCIÓN

En poco más de un siglo, la industria del automóvil se convirtió en uno de los principales sectores económicos, con decenas de millones de empleados en todo el mundo. En los últimos años, se realizaron grandes inversiones en la infraestructura vial de distintas ciudades y los vehículos a motor se transformaron en obras maestras que mezclan componentes mecánicos y electrónicos.

El progreso de la industria del transporte ha sido un factor esencial en el desarrollo de nuestra sociedad y este provocó el nacimiento o crecimiento de otras ramas económicas. Sin embargo, el aumento del número de vehículos y conductores también trajo consigo un incremento considerable en el número de muertes humanas debido a accidentes automovilísticos. Entre los años 2010 y 2012, se registraron solo en Europa un total de 3337231 accidentes de tráfico, los cuales implicaron la pérdida de 90268 vidas humanas [1]. Los accidentes automovilísticos son la causa principal de muerte para los seres humanos de edades comprendidas entre 1 y 34 años en Europa y los Estados Unidos cada año. Por esto, la seguridad en la transportación se ha convertido en los últimos años en un tema de gran importancia tanto para la industria como la academia.

La comunicación vehicular es vista como una tecnología clave para mejorar la seguridad vial y la eficiencia de tráfico a través de los Sistemas de Transporte Inteligente (ITS, Intelligent Transportation Systems). Una red ad-hoc vehicular (VANET, Vehicular Ad-hoc Network) es un caso particular de red ad-hoc móvil (MANET, Mobile Ad-Hoc Network) orientada a entornos vehiculares. Una VANET está formada por un conjunto de nodos que se comunican entre sí mediante interfaces inalámbricas sin la necesidad de una infraestructura de red fija [2]. Cada nodo actúa como un router y tiene la capacidad de encaminar paquetes hacia su destino. Los nodos se corresponden con vehículos (automóviles, camiones, autobuses, etc.) y forman la red en pleno movimiento, por ejemplo, mientras circulan por una autopista o zona urbana. Por tanto, los nodos se mueven de forma arbitraria y se comunican entre sí (vehículo-vehículo V2V), pudiendo comunicarse también con equipos fijos próximos a las vías que formen parte de la red y que proveerán una conexión hacia o desde redes basadas en infraestructura, lo cual puede incluir conexión con Internet (vehículo-infraestructura V2I e infraestructura-vehículo I2V). El objetivo principal de las VANETs es proporcionar seguridad vial y eficiencia en el transporte, aunque también pueden usarse para otros fines: comerciales, acceso a Internet, etc.

El creciente interés hacia la aplicación de las tecnologías inalámbricas para la comunicación en entornos de vehículos ha llevado a distintos consorcios (PATH [3], EU C2C-CC [4], JP ITS [5]) y organismos de normalización (IEEE [6], ISO [7]), a proponer distintos protocolos de

comunicación y soluciones de arquitecturas de red, para la implementación exitosa de estos sistemas.

En el año 1991, el Congreso de los Estados Unidos propuso la creación del programa llamado sistemas de vehículos inteligentes en autopistas (IVHS, Intelligent Vehicle Highway Systems) con el objetivo de incrementar la seguridad vial, evitar la congestión, reducir la contaminación medioambiental, y elevar la preservación de combustibles fósiles. La implementación de este programa fue asumida por el departamento de transportación de los Estados Unidos (US DOT, U. S. Department of Transportation), quien se apoyó para llevar a cabo la tarea en la asociación de transporte inteligente de América (ITSA, Intelligent Transportation Society of America), una organización sin fines de lucro con miembros de la industria, academia, federales y gobiernos municipales. Para el año 1996, el DOT, ITSA y otras partes interesadas, habían desarrollado la arquitectura nacional para los sistemas de transporte inteligentes (NITSA, National Intelligent Transportation Systems Architecture), organización que en los años siguientes definió los servicios de los ITS.

En octubre de 1999, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, Federal Communications Commission) de los Estados Unidos asignó 75 MHz del espectro en la banda de 5.9 GHz destinados a las comunicaciones dedicadas de corto alcance (DSRC, Dedicated Short Range Communications) para dar soporte a los ITS [8]. En noviembre de 2004, el grupo de trabajo p de IEEE (IEEE Task Group p), inició el desarrollo de una recomendación del estándar 802.11 (IEEE 802.11p [9]) para incluir los entornos vehiculares, mientras que el grupo de trabajo IEEE 1609 (IEEE working group 1609), especificó un conjunto de protocolos para las capas adicionales. Estos estándares son: IEEE 1609.1 [10] – actividades de gestión, IEEE 1609.2 [11] – seguridad de red, IEEE 1609.3 [12] – interconexión de red e IEEE 1609.4 [13] – operación multicanal. La combinación del estándar IEEE 802.11p y el conjunto de protocolos 1609, definen en Estados Unidos la arquitectura de red para los futuros ITS nombrada acceso inalámbrico en entornos vehiculares (WAVE, Wireless Access in Vehicular Environments) [14]. WAVE incluye un conjunto de protocolos para la comunicación en entornos vehiculares, destinados a proveer soporte a las diferentes aplicaciones de seguridad vial y eficiencia en el transporte.

Evaluar las implementaciones de los protocolos, desempeño de las arquitecturas de red y el impacto del despliegue de las aplicaciones en escenarios reales, es crucial para el correcto funcionamiento de las VANETs. Los altos costos que esto implica hacen que los estudios basados en simulación constituyan un método efectivo y ampliamente adoptado por la comunidad científica. Las herramientas de simulación emplean modelos para determinar si un proyecto es viable o no en el mundo real. Los modelos deben aproximarse lo más posible a la realidad para obtener resultados confiables y precisos. Los simuladores VANETs necesitan modelar aspectos específicos como: alta movilidad, comportamiento del conductor, elevado número de nodos, obstáculos de radio, señales de tránsito, entre otras. En una simulación VANET es necesario emplear un modelo de movilidad que refleje el comportamiento real del

tráfico de los vehículos [15]. La utilización de un modelo de movilidad microscópico permite modelar a los vehículos y sus interacciones con un alto nivel de detalle. Un modelo de movilidad realista debe incluir una topología de mapa real que presente diferentes densidades de carreteras e intersecciones, así como varias categorías de calles con distintos límites de velocidad.

La habilitación de la mayoría de las aplicaciones VANETs depende de dos tipos de mensajes: 1) conducidos por eventos y 2) periódicos. Los mensajes conducidos por eventos, también conocidos como mensajes descentralizados de notificación de entorno (DENMs, Decentralized Environmental Notification Messages) [16], son los que se generan y diseminan cuando se detecta y/o produce algún tipo de situación excepcional o peligrosa, como puede ser un accidente, explosión de una bolsa de aire, proximidad de vehículo que se mueve en sentido contrario, obras en la vía, frenado brusco, situación anómala de la carretera, etc. Los mensajes periódicos son difundidos con cierta frecuencia por cada vehículo de la red, para proveer información de estado (posición, velocidad, aceleración, dirección, etc.) a los vehículos que están dentro de su rango de comunicación. Estos se conocen como mensajes de conocimiento cooperativo (CAMs, Cooperative Awareness Messages) o “beacons” [17] y son esenciales para la habilitación de las aplicaciones de conocimiento cooperativo (Cooperative Awareness Applications).

Las aplicaciones enfocadas a la seguridad vial y gestión del tráfico son las más importantes y críticas en el ámbito de las redes vehiculares. Las primeras tienen como objetivo: disminuir el número de muertes humanas debido a accidentes automovilísticos, mientras que las segundas se enfocan en: coordinar el tráfico en distintos puntos y/o secciones de una carretera, y reducir los atascos de tráfico mediante la monitorización y redistribución del tráfico por rutas menos pobladas. Los requerimientos de comunicación de las aplicaciones vehiculares, todavía no se han definido claramente. No obstante, se están realizando importantes esfuerzos para definir los valores límites aceptados por cada aplicación con respecto a métricas como: probabilidad de recepción exitosa de paquetes (Pr), demora de extremo a extremo (DEE) y error de posición máximo (EPM). Según [18], la probabilidad de recepción exitosa no debe ser inferior a 0.99 para las aplicaciones críticas de seguridad vial, sin embargo, para otras aplicaciones menos exigentes como la de gestión de tráfico: control de velocidad adaptativo cooperativo (CACC, Cooperative Adaptive Cruise Control) [19], la probabilidad de recepción exitosa puede ser inferior a 0.99. Inicialmente, se especificó un límite de 500 ms en cuanto a los requerimientos de demora de extremo a extremo para la información crítica de seguridad vial, y de 200 ms para los sistemas cooperativos en tiempo real como CACC [18, 20]. Trabajos más recientes, limitan la latencia de estas aplicaciones a 100 ms, y definen 500 ms para aplicaciones no relacionadas con la seguridad vial como el acceso a Internet [21]. Mientras que en [22], se define un error de posición máximo inferior a: 1 m para las aplicaciones críticas de seguridad vial, 5 m para las aplicaciones de conducción cooperativa, y de hasta 30 m para los protocolos de enrutamiento.

IEEE 802.11p [9] es el estándar definido para el control de acceso al medio (MAC, Medium Access Control) y la capa física (PHY, Physical Layer) en el conjunto de protocolos WAVE. IEEE 802.11p es una alternativa a los estándares 802.11 actuales, estando su desarrollo dirigido a proveer comunicaciones robustas y de baja latencia en escenarios vehiculares de alta movilidad y elevado dinamismo en la topología de red. IEEE 1609.4 [13] complementa el funcionamiento de la capa MAC IEEE 802.11p para proveer coordinación entre los múltiples canales del espectro. En las redes vehiculares la información que se intercambia entre los diferentes nodos de la red puede repercutir en la habilidad del sistema para preservar vidas humanas, por tanto, cualquier solución tecnológica debe ser probada exhaustivamente antes de su integración en un sistema real. Tradicionalmente, las simulaciones de redes vehiculares se han realizado utilizando modelos generales de IEEE 802.11 o ajustándolos para emplear los parámetros de IEEE 802.11p. Este enfoque produce resultados de poca precisión, reduciendo la validez de la simulación [23]. La disponibilidad de los simuladores VANETs realistas [24], los cuales integran un simulador de tráfico vehicular y un simulador de red, donde el intercambio de información puede influir incluso sobre el patrón de movimiento de los vehículos, y la implementación reciente de un proyecto que modela el conjunto de protocolos de la arquitectura de red WAVE a nivel MAC y PHY [25], ha planteado el problema científico siguiente:

¿Cómo se desempeñan los protocolos IEEE 802.11p/1609.4 en escenarios vehiculares reales?

El objetivo general del trabajo es:

Evaluar el desempeño de los protocolos IEEE 802.11p/1609.4 en entornos VANET usando un modelo de movilidad realista.

Para dar cumplimiento al objetivo general fueron trazados los objetivos específicos siguientes:

- ❖ Describir los protocolos IEEE 802.11p/1609.4 propuestos para la capa MAC y PHY de la arquitectura de red: acceso inalámbrico en entornos vehiculares (WAVE).
- ❖ Caracterizar los modelos de movilidad que generan patrones de movimiento vehicular realistas.
- ❖ Seleccionar las herramientas de simulación que más se ajusten a escenarios VANET reales, teniendo en cuenta la generación de movilidad vehicular y la comunicación inalámbrica.
- ❖ Evaluar a través de simulación el desempeño de los protocolos IEEE 802.11p/1609.4 en entornos VANETs, con la consecuente discusión y análisis crítico de los resultados obtenidos.

El trabajo presenta esta estructura: introducción, capitularios, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos. En el capítulo 1 se presenta la arquitectura de red conocida como acceso inalámbrico en entornos vehiculares (WAVE), describiendo los principales aspectos de los

protocolos IEEE 802.11p/1609.4 que definen el funcionamiento de la capa MAC y PHY. En el capítulo 2 se caracterizan los modelos de movilidad vehicular realistas, además se presentan las herramientas y escenarios de simulación. En el capítulo 3, se evalúa mediante simulación el desempeño de los protocolos IEEE 802.11p/1609.4 en escenarios vehiculares reales, con la consecuente discusión y análisis de los resultados obtenidos. Finalmente en las conclusiones, son enunciados aquellos elementos de mayor interés y generalización, obtenidos a partir de los objetivos, mientras que las recomendaciones refieren los tópicos que aún quedan abiertos a líneas futuras de investigación.

# 1. Acceso inalámbrico en entornos vehiculares (WAVE)

## 1.1 Dispositivos

Los sistemas WAVE están compuestos por dos tipos de dispositivos: las unidades a bordo (OBUs, On-Board Units) y las unidades situadas al borde de la carretera (RSUs, Road-Side Units). Una OBU [26], es un dispositivo de red que está ubicado dentro del vehículo capaz de intercambiar datos con otras OBUs y RSUs que se encuentran en el dominio ad-hoc (V2V y V2I), a través de una interfaz para la comunicación inalámbrica que utiliza tecnología WAVE. Una RSU [27], es un dispositivo estacionario ubicado en puntos estratégicos a lo largo de una carretera o en lugares como: gasolineras y aparcamientos, el cual usa una interfaz inalámbrica WAVE para proveer conexión hacia o desde redes basadas en infraestructura (V2I e I2V), lo cual puede incluir comunicación con Internet.

La Figura 1.1 muestra un escenario típico, donde una OBU está en el rango de comunicación de dos RSUs y viceversa. Los triángulos dibujados con líneas discontinuas mirando hacia arriba, representan el rango de comunicación de las RSUs, mientras que el triángulo dibujado con una línea continua mirando hacia abajo ilustra el rango de comunicación de la OBU. Como la OBU se desplaza entre las zonas de comunicación de las RSUs, utiliza la tecnología WAVE para intercambiar información con ellas. Además, usa la interfaz inalámbrica WAVE para comunicarse con otras OBUs.

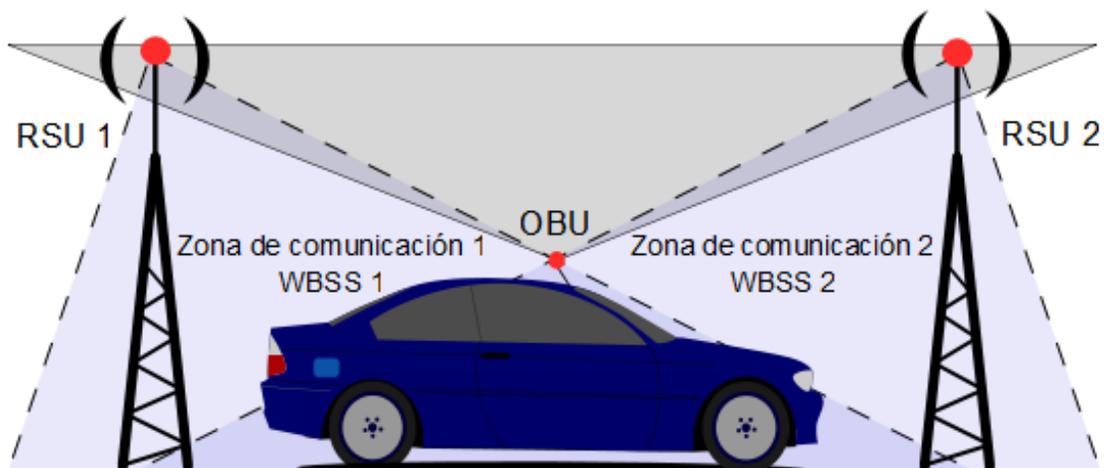


Figura 1.1: Tecnología WAVE: desplazamiento de una OBU entre las zonas de comunicación de dos RSUs.

En la Figura 1.2 se muestra un escenario donde los postes de luz ubicados a lo largo de la vía están equipados con RSUs. Cada RSU tiene un rango de comunicación representado por una circunferencia, y los vehículos atraviesan las distintas zonas de comunicación a medida que se desplazan por la carretera. Los sistemas WAVE introducen el término conjunto básico de servicios WAVE (WBSS, WAVE Basic Service Set) para diferenciar las distintas zonas de comunicación. Los vehículos solo pueden pertenecer a una I2V WBSS a la vez, de aquí que cada zona de comunicación presente su propio identificador WBSS. De izquierda a derecha, la primera zona de comunicación es WBSS-1, y la última es WBSS-4. Los vehículos que se encuentran uno cerca del otro, como el auto B y C, pueden establecer una comunicación V2V entre ellos (WBSS-5). La zona de comunicación WBSS-1 es una sesión I2V, mientras que la WBSS-5 constituye una sesión V2V. Los vehículos pueden pertenecer a una sesión I2V y V2V, al mismo tiempo.

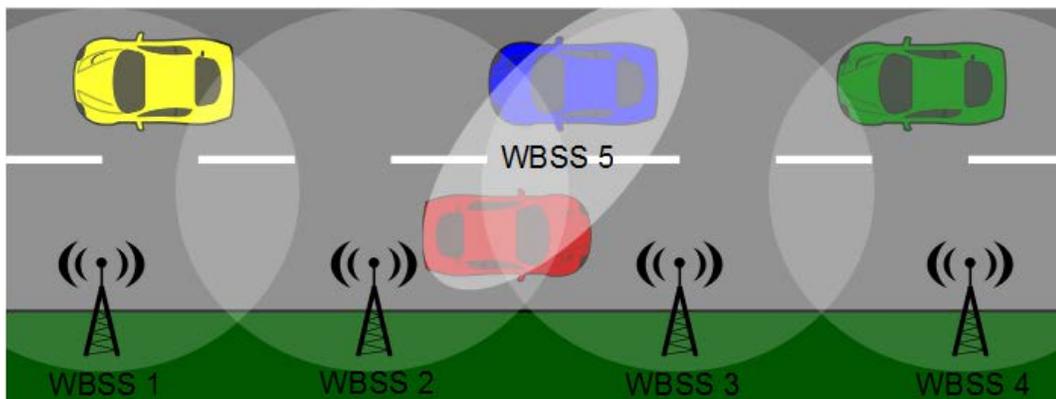


Figura 1.2: Distribución de WBSS a lo largo de una autopista.

La zona de comunicación cubierta por cada RSU con tecnología WAVE está limitada a 1 Km de diámetro, y el intercambio de datos se produce en la banda de los 5.9 GHz. Las OBU's deben unirse a la zona de comunicación (WBSS) de la RSU que esté más cerca e intercambiar información durante un cierto tiempo. La naturaleza altamente dinámica de las VANETs hace que en muchos casos este tiempo sea muy pequeño, lo que impone grandes retos en el diseño de los estándares WAVE. Los dispositivos de comunicación WAVE emplean una arquitectura que utiliza un canal de control y varios canales de servicio. El canal de control se utiliza para transmitir información de control y anunciar los distintos servicios WAVE, mientras que los canales de servicio se usan para transmitir información relacionada a las aplicaciones de seguridad vial, gestión del tráfico y valor añadido.

## 1.2 Espectro designado

En el año 1999, la FCC asignó 75 MHz del espectro en la banda de 5.9 GHz para dar soporte a los ITS en Estados Unidos [8]. Los 75 MHz de la banda se extienden desde 5.850 GHz hasta

5.925 GHz y se dividen en 5 MHz de banda de guarda más siete canales de 10 MHz cada uno. El canal de control (CH 178) está reservado para aplicaciones relacionadas a la seguridad vial y para el intercambio de mensajes de control. Los dos canales en los extremos de la banda (CH 172, CH 184) están reservados para usos especiales, o sea, el CH 172 para mitigar accidentes (Accident avoidance) y el CH 184 para la transmisión de largo alcance con alta potencia (High power – Long range). Los cuatro canales de servicio restantes (CH 174, CH 176, CH 180, CH 182) pueden ser empleados por aplicaciones relacionadas o no a la seguridad vial. También existe la posibilidad de combinar canales de servicio adyacentes para formar dos canales de 20 MHz; CH 175 (combinación de CH 174 y CH 176) y CH 181 (combinación de CH 180 y CH 182), lo cual permite obtener razones de datos superiores a las alcanzadas con un canal de 10 MHz. En la Figura 1.3 se muestra una representación de la distribución de la banda designada así como el rango de frecuencias y la máxima potencia de transmisión permitida para cada canal.

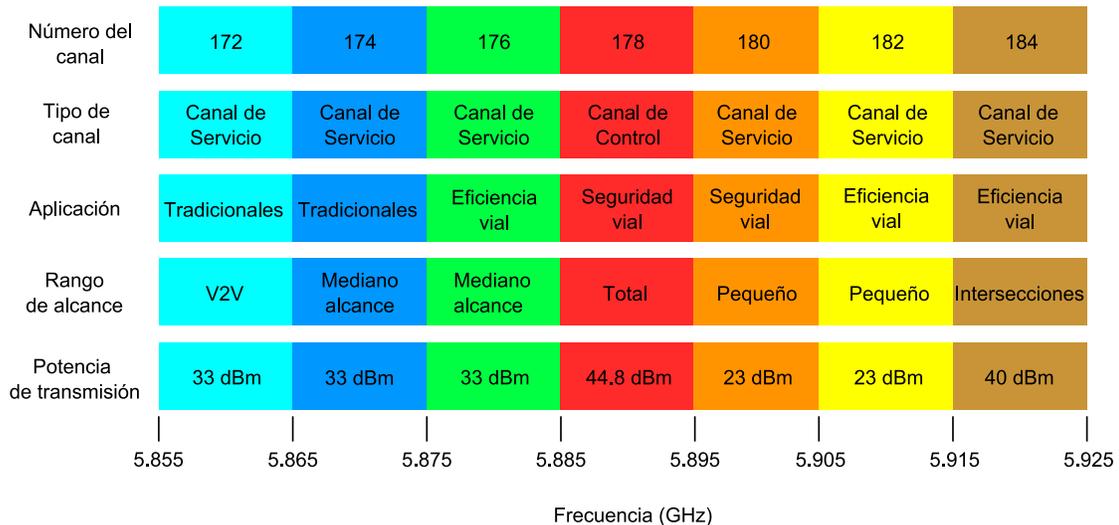


Figura 1.3: Conjunto de canales definidos para los sistemas WAVE.

### 1.3 Arquitectura de red

Desde una perspectiva de capas, la arquitectura de red WAVE se basa en la propuesta por el modelo OSI, como se observa en la Figura 1.4. El estándar WAVE no especifica la capa de sesión, presentación y aplicación, e introduce dos elementos que no existen en el modelo OSI: el bloque gestor de recursos y de servicios de seguridad. En la capa de Control de Acceso al Medio (MAC, Medium Access Control) y física (PHY, Physical Layer), la arquitectura de red WAVE define el uso del protocolo IEEE 802.11p [9]. En la parte superior de la capa MAC se encuentra el estándar IEEE 1609.4 [13] que se encarga de la operación multicanal, es decir, de coordinar el acceso a los múltiples canales del espectro. En la capa de servicios de red, la arquitectura WAVE especifica el estándar IEEE 1609.3 [12], que introduce un protocolo de

mensajes cortos (WSMP, Wave Short Messages Protocol) para gestionar el tráfico de las aplicaciones relacionadas a la seguridad vial en las capas de red y transporte. Las actividades de gestión requeridas para una correcta operación de las aplicaciones vehiculares son definidas por el estándar IEEE 1609.1 [10], mientras que los elementos a tener en cuenta para establecer una comunicación segura son especificados por el estándar IEEE 1609.2 [11]. Las funciones que cumplen los distintos protocolos de la arquitectura de red WAVE se resumen en la Tabla 1.1.

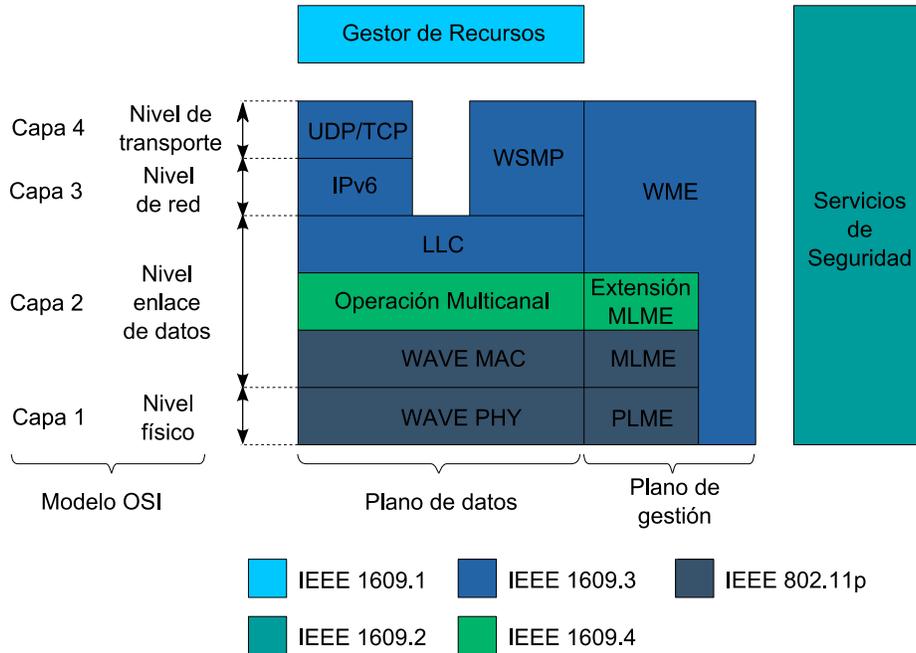


Figura 1.4: Arquitectura de red acceso inalámbrico en entornos vehiculares (WAVE).

Tabla 1.1 Lista de estándares WAVE

Capa WAVE	Estándar	Propósito
MAC y PHY	IEEE 802.11p	Especifica los requisitos de la capa MAC y PHY para trabajar en entornos vehiculares.
Operación multicanal	IEEE 1609.4	Mejora la capa MAC IEEE 802.11p para soportar operación multicanal.
Servicios de red	IEEE 1609.3	Proporciona servicios de direccionamiento y enrutamiento.
Servicios de seguridad	IEEE 1609.2	Cubre el formato de los mensajes seguros y su procesamiento.
Gestor de recursos	IEEE 1609.1	Brinda acceso a los recursos de comunicación.

La arquitectura de red WAVE especifica en la capa de servicios de red dos conjuntos de protocolos: WSMP (nivel de red y transporte) e IPv6 (nivel de red) más UDP/TCP (nivel de transporte). El objetivo es usar el protocolo WSMP para aplicaciones sensibles a la demora y de alta prioridad como las relacionadas a la seguridad vial y gestión del tráfico, mientras se emplean los protocolos IP y UDP/TCP para las aplicaciones tradicionales de Internet. En las VANETs, los paquetes WSM (Wave Short Messages) pueden requerir de servicios especiales

como ser transmitidos con cierta potencia, razón de datos o prioridad, para maximizar la probabilidad de recepción exitosa de paquetes o disminuir la demora, y de esta forma mitigar posibles accidentes. Estas razones particulares imponen retos en el diseño de mecanismos de control de la capa MAC y PHY WAVE, los cuales deben examinar varios parámetros para ajustar los niveles de potencia y la razón de transmisión de los paquetes antes de que estos sean enviados al canal de comunicaciones.

### 1.3.1 IEEE 802.11p - Capa MAC y PHY

Las capas MAC y PHY de la arquitectura de red WAVE están basadas en el estándar IEEE 802.11a y se encuentran definidas por el protocolo IEEE 802.11p. La fundamentación de la tecnología WAVE en IEEE 802.11 [28] se debe en gran medida a consideraciones de costo, disponibilidad, gran aceptación y amplio reconocimiento de este estándar por expertos en tecnologías inalámbricas de todo el mundo. Además, era necesario un estándar estable capaz garantizar la interoperabilidad entre vehículos de diferentes fabricantes y RSUs de distintas regiones geográficas. Estar asociado a la familia IEEE 802.11 provee múltiples mejoras, sin embargo, fue necesario desarrollar una versión nueva de protocolo IEEE 802.11 adaptada a los entornos vehiculares y que cumpla con los requerimientos de las aplicaciones de seguridad vial y gestión del tráfico.

El protocolo IEEE 802.11p [9] constituye el estándar clave para la capa MAC y PHY en el conjunto de protocolos conocido como WAVE. IEEE 802.11p representa una alternativa a los estándares Wi-Fi actuales, estando su desarrollo dirigido a proveer comunicaciones robustas y de baja latencia en entornos vehiculares de alta movilidad y gran dinamismo en la topología de red. La capa MAC del protocolo IEEE 802.11p usa acceso múltiple con censado de portadora y evasión de colisión (CSMA/CA, Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) para proporcionar acceso justo al canal y reducir las colisiones de paquetes. Además se basa en la función denominada acceso al canal distribuido mejorado (EDCA, Enhanced Distributed Channel Access) del estándar IEEE 802.11e para proveer calidad de servicio (QoS, Quality of Service).

El mecanismo EDCA de 802.11p provee QoS a través de la utilización de cuatro categorías de acceso (ACs, Access Categories) por cada canal CCH o SCH, como se observa en la Figura 1.5. Las categorías de acceso, denotadas por AC\_0, AC\_1, AC\_2, AC\_3, se relacionan con cuatro clases de tráfico y cada una de ellas presenta una cola y un proceso de contención independiente. En la Tabla 1.2 se muestran los parámetros de contención y las clases de tráfico correspondientes a las categorías de acceso para cada canal CCH o SCH. En el proceso de transmisión de los datos cada trama se enmarcan en una de las categorías de acceso atendiendo al nivel de prioridad de la información, y se llevan a cabo dos procedimientos de disputa para acceder al medio: mecanismo de disputa interior que ocurre dentro de cada canal entre las múltiples categorías de acceso y mecanismo de disputa exterior que ocurre entre los canales de los distintos nodos.

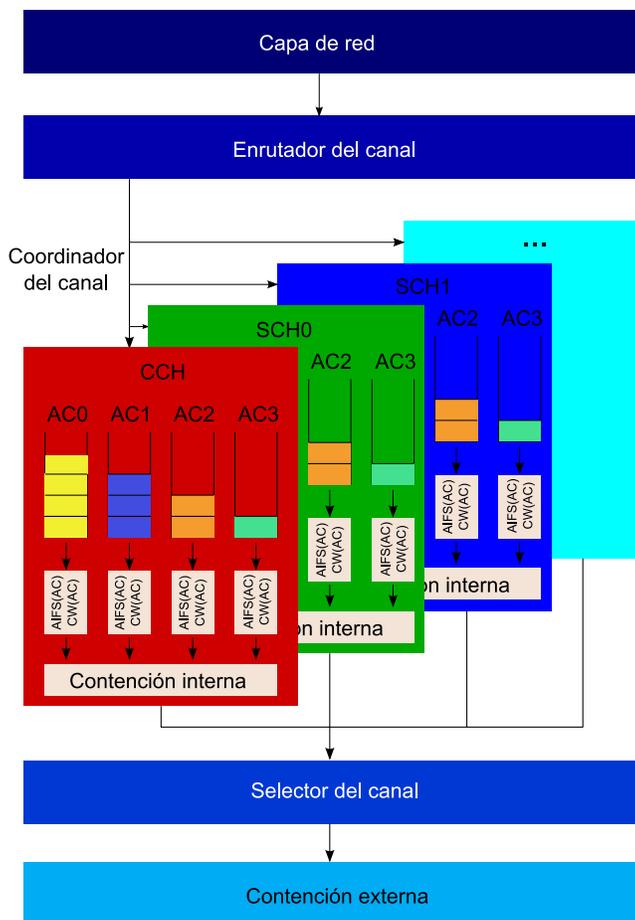


Figura 1.5: Relación entre la operación multicanal y priorización del tráfico con distintas categorías de acceso (ACs) en la capa MAC de IEEE 802.11p.

Tabla 1.2 Parámetros de contención para las categorías de acceso (ACs) [9]

Categoría	AC0	AC1	AC2	AC3
Tipo de tráfico	Background	Mejor esfuerzo	Video	Voz
CW <sub>mín</sub>	aCW <sub>mín</sub>	aCW <sub>mín</sub>	$\frac{aCW_{mín} + 1}{2} - 1$	$\frac{aCW_{mín} + 1}{4} - 1$
CW <sub>máx</sub>	aCW <sub>máx</sub>	aCW <sub>máx</sub>	aCW <sub>mín</sub>	$\frac{aCW_{mín} + 1}{2} - 1$
AIFSN	9	6	3	2

El protocolo IEEE 802.11p usa CSMA/CA en su variante función de coordinación distribuida (DCF, Distributed Coordination Function) para controlar el acceso al canal de comunicaciones reduciendo el riesgo de colisiones de paquetes. El mecanismo DCF funciona de manera distribuida, haciendo que las estaciones accedan al medio aleatoriamente. Para esto define dos tipos de tiempo de espera: el espacio arbitrario entre tramas (AIFS, Arbitrary Interframe Spaces) y la ventana de contención (CW, Contention Window), que se divide en ranuras de tiempo equidistantes (slots backoff). Una vez que el medio está desocupado, la estación espera

un tiempo que es la suma del AIFS y un número aleatorio de ranuras de backoff. Durante la espera, la estación censa la ocupación del canal de comunicaciones. Si el canal es ocupado antes que expire el tiempo de contención, se guarda el valor de backoff y se reanuda después que finalice la transmisión de la estación que ganó el proceso de disputa de acceso al canal. En la Figura 1.6 se representa el principio de funcionamiento de CSMA/CA en el modo DCF para cada categoría de acceso. En la Figura 1.7 se muestra el retardo que experimenta cada clase de tráfico por canal CCH o SCH para acceder al canal de comunicaciones, siendo las categorías de acceso con menor retardo, las que tienen una mayor probabilidad de ganar el proceso de acceso al medio.

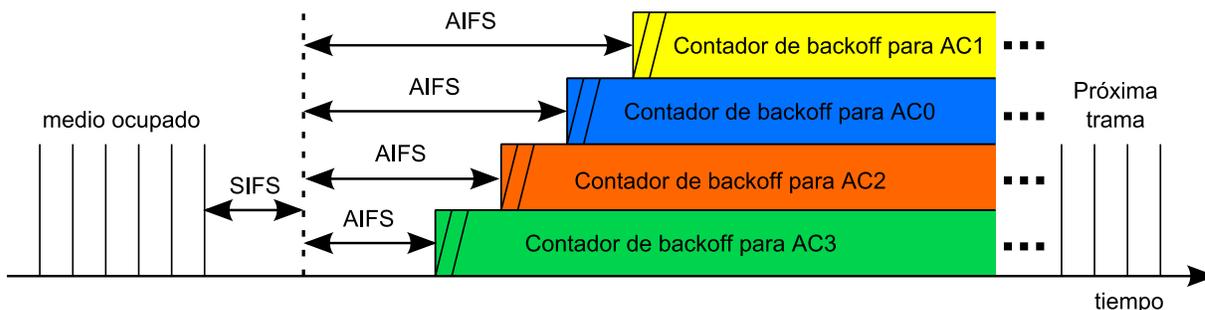


Figura 1.6: Funcionamiento de CSMA/CA en el modo DCF según la categoría de acceso para IEEE 802.11p.

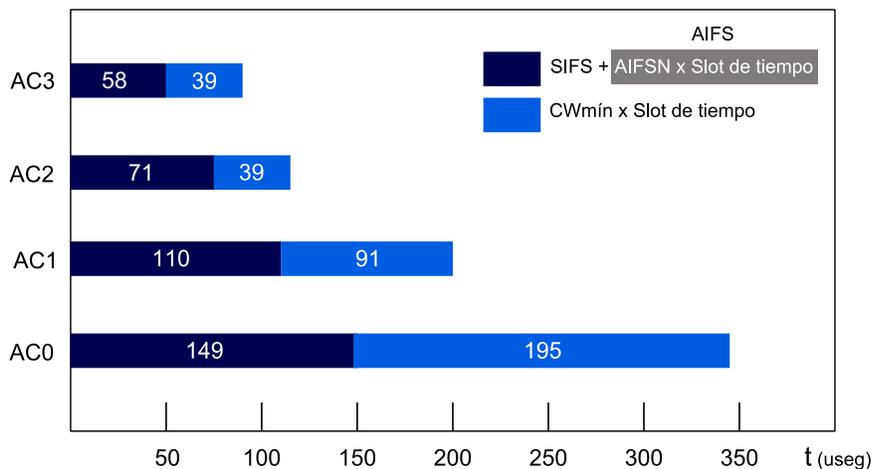


Figura 1.7: Retardo de envío definido por IEEE 802.11p para las categorías de acceso (ACs).

En la capa PHY, IEEE 802.11p utiliza multiplexación por división ortogonal de frecuencia (OFDM, Orthogonal Frequency - Division Multiplexing), especifica un rango de transmisión de hasta 1000 metros, define tasas de transmisión de 3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24 y 27 Mbit/s en canales de 10 MHz y tasas de transmisión de 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 y 54 Mbit/s en canales de 20 MHz. En el sistema comprende 52 subportadoras, moduladas empleando BPSK, QPSK,

16-QAM, o 64-QAM y las razones de codificación siguientes: 1/2, 2/3 o 3/4 (ver Tabla 1.3). Las razones de datos están determinadas por la razón de codificación y el tipo de modulación, como se observa en la Tabla 1.4.

Tabla 1.3 Parámetros del protocolo IEEE 802.11p [29]

Parámetro	Modulación
Mecanismo de Acceso al Medio	CSMA/CA
Razón de datos (canal 10 MHz)	3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24 y 27 Mbps
Modulación	BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM
Razón de codificación	1/2, 2/3 y 3/4
Número de sub-portadoras	52
Tiempo de símbolo OFDM	8 $\mu$ s
Intervalo de guarda	1.6 $\mu$ s
Duración del preámbulo	32 $\mu$ s
Espacio entre sub-portadoras	0.15625 MHz

Tabla 1.4 Variantes de transmisión definidas por IEEE 802.11 en canales de 10 MHz [30]

Razón de datos (Mbit/s)	Modulación	Razón de codificación	Sensibilidad (dBm)
3	BPSK	1/2	- 85
4,5	BPSK	3/4	- 84
6	QPSK	1/2	- 82
9	QPSK	3/4	- 80
12	16-QAM	1/2	- 77
18	16-QAM	3/4	- 73
24	64-QAM	2/3	- 69
27	64-QAM	3/4	- 68

### 1.3.2 IEEE 1609.4 - Operación multicanal

En los sistemas WAVE, las OBUs y RSUs pueden funcionar con dos tipos de dispositivos de radio [31]: a) los dispositivos WAVE de un solo canal que intercambian datos y/o escuchan un único canal de RF a la vez, y b) los dispositivos WAVE multicanal que intercambian datos y/o escuchan al menos dos canales a la vez. Para lograr la interoperabilidad entre los dispositivos uni-canal y multi-canal, la tecnología WAVE introduce un mecanismo de sincronización que consiste en que todos los dispositivos de la red monitoreen y/o utilicen el canal CCH por un intervalo común de tiempo.

La operación multicanal se adapta a los entornos vehiculares, por ejemplo, los vehículos que se desplazan por una carretera sintonizan el CCH para recibir información de aplicaciones relacionadas a la seguridad vial, y un SCH determinado para recibir datos de aplicaciones de gestión del tráfico, mientras que los vehículos que están en una estación de servicio dentro de la misma zona de comunicación, pueden seleccionar un SCH diferente para recibir datos de aplicaciones de valor añadido como: pagar la gasolina y/o descargar un mapa. En los sistemas WAVE, la sintonía obligatoria de un canal de control y la opcional de un canal de servicio posibilita que se ejecuten en el vehículo aplicaciones de diferentes características en función del contexto.

El estándar IEEE 1609.4 [13] complementa el funcionamiento de la capa MAC IEEE 802.11p para proveer coordinación entre los múltiples canales del espectro. IEEE 1609.4 define que los dispositivos de radiocomunicación WAVE deben sintonizar el canal de control por un intervalo de tiempo CCH, y después conmutar a alguno de los canales de servicio donde pueden transmitir y recibir datos durante el intervalo de tiempo SCH, como se muestra en la Figura 1.8. El monitoreo del canal de control (CCH) se repite cada un tiempo conocido como intervalo de sincronismo y al inicio de cada ranura CCH o SCH se añade un intervalo de guarda para eliminar las inexactitudes que se presentan debido a las diferentes velocidades de conmutación de los dispositivos de radiocomunicación. La conmutación sincrónica de canal entre todos los nodos de la red se logra mediante una base de tiempo universal coordinada (UTC, Coordinated Universal Time) como puede ser los datos proporcionados por el sistema GPS [32].

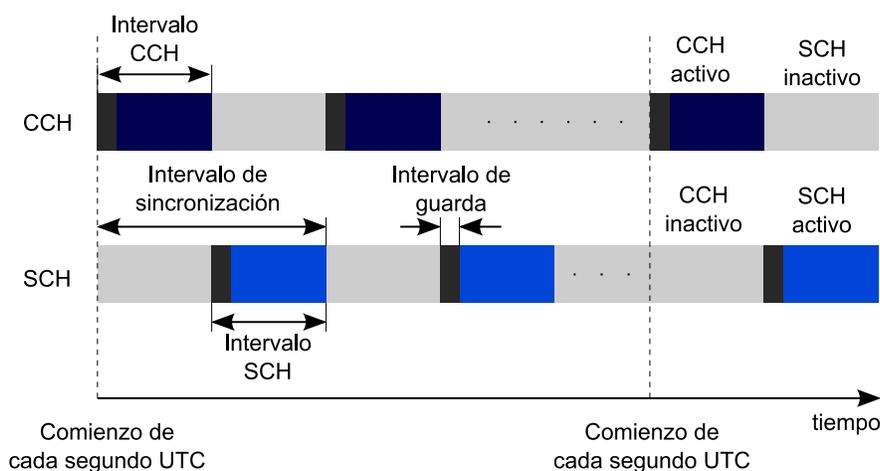


Figura 1.8: Intervalos de sincronismo, guarda, CCH y SCH utilizados en la operación multicanal del protocolo IEEE 1609.4.

### 1.3.3 IEEE 1609.3 - Capa de servicios de red

El estándar IEEE 1609.3 [12] especifica las funciones asociadas a las capas de transporte, red y control lógico de enlace (LLC, Logical Link Control) del modelo OSI, y las llama servicios de red WAVE. Los servicios de red WAVE se pueden dividir en dos grupos: a) servicios del plano de datos cuya función es transportar tráfico, y b) servicios del plano de gestión cuya función es la configuración y el mantenimiento del sistema.

En el plano de datos, la arquitectura WAVE soporta dos pilas de protocolos, el tradicional IPv6 y WSMP, ambos operan sobre la capa LLC. Esta doble configuración posibilita que el WSMP se use para el intercambio de datos de alta prioridad y sensible a la demora, mientras

que los protocolos UDP/TCP/IP se utilicen para comunicaciones más tradicionales y menos exigentes.

En la capa LLC, los dispositivos WAVE deben implementar la operación uno descrita en [33], el protocolo de acceso a subredes (SNAP, Sub-Network Access Protocol) especificado en [34] y el estándar para la transmisión de datagramas IP sobre redes IEEE 802 definido en la RFC 1042 [35].

Los dispositivos WAVE deben implementar el protocolo IPv6 así como UDP y TCP. Los fabricantes pueden implementar otra recomendación de grupo de trabajo de ingeniería de internet (IETF, Internet Engineering Task Force) siempre que no dificulte la interoperabilidad con otros dispositivos WAVE.

Los servicios del plano de gestión especificados en IEEE 1609.3 se conocen como la entidad de gestión WAVE (WME, WAVE Management Entity) y abarcan:

- ❖ Registro de aplicación: las aplicaciones que pretendan utilizar los servicios de red WAVE se deben registrar previamente en la WME. Cada aplicación se registra con un identificador de proveedor de servicio único (PSID, Provider Service Identifier). La información se almacena en diferentes tablas, conteniendo datos sobre la aplicación que proporciona el servicio, los servicios que son de interés para las aplicaciones que residen en la unidad local, así como la dirección IP y los puertos utilizados por las aplicaciones.
- ❖ Gestión de WBSS: las WME se encargan de iniciar un WBSS a favor de cualquier aplicación que provea un servicio. Para esto es necesario realizar operaciones como: establecer una conexión, adición y eliminación dinámica de las aplicaciones de los WBSSs, inclusión y recuperación de credenciales de seguridad, mantenimiento del estado de cada aplicación de un WBSS.
- ❖ Monitoreo del uso de los canales: las WME supervisan los patrones de uso de canales SCHs para elegir el que tenga una menor probabilidad de congestión en el momento de establecer un WBSS.
- ❖ Configuración IPv6: administra las direcciones locales, globales y multicast de IPv6 en los dispositivos.
- ❖ Monitoreo del indicador de potencia recibida por canal (RCPI, Received Channel Power Indicator): las aplicaciones pueden solicitar a un dispositivo información sobre el nivel de potencia de señal recibida.
- ❖ Mantenimiento de la base de información de gestión (MIB, Management Information Base): la WME administra una MIB que contiene información sobre el sistema y las aplicaciones.

### 1.3.4 IEEE 1609.2 - Servicios de seguridad

En las redes ad-hoc vehiculares se necesitan mecanismos para mitigar posibles ataques de red y establecer comunicaciones seguras. El estándar IEEE 1609.2 [11] especifica los servicios de seguridad en la arquitectura de red WAVE. Las aplicaciones vehiculares tienen restricciones únicas de seguridad debido a su amplia gama de funcionamiento. Por ejemplo, las aplicaciones de seguridad vial son sensibles a la demora, esto hace que el procesamiento y el tamaño del encabezado deba ser el mínimo posible. Otras aplicaciones pueden requerir un mecanismo de autenticación escalable y flexible, debido al número potencialmente elevado de vehículos que pueden converger durante cierto tiempo. En cada caso, se deben proteger los mensajes de ser escuchados, alterados y repetidos. Además, se debe proporcionar al usuario el derecho a la privacidad, evitando la identificación y el alcance a información no autorizada por parte de terceros.

El estándar IEEE 1609.2 define los servicios de seguridad de red para los sistemas WAVE y las aplicaciones vehiculares que se ejecuten sobre los protocolos de la capa de transporte y red. IEEE 1609.2 proporciona mecanismos de autenticación para mensajes de gestión WAVE, autenticación de mensajes que no requieren la anonimidad y encriptación de datos enviados hacia un destino conocido utilizando llaves públicas o secretas. La encriptación contribuye a evitar la interceptación y/o alteración de un mensaje. La autenticación (confirmación del origen del mensaje) e integridad (confirmación de que el mensaje no ha sido modificado en el tránsito), evitan que el destinatario acepte mensajes con contenidos incorrectos. En las redes WAVE, el anonimato de los usuarios finales se considera un requerimiento. Los mecanismos criptográficos proveen la mayoría de éstos requisitos de seguridad, y sus familias principales son: algoritmos simétricos o de llave secreta, algoritmos asimétricos o de llave pública y funciones hash.

### 1.3.5 IEEE 1609.1 - Gestor de recursos

El estándar IEEE 1609.1 [10] define una entidad WAVE nombrada gestor de recursos (RM, Resource Manager), cuyo propósito es proporcionar a ciertos procesos el acceso a los recursos de comunicación del sistema. El RM está ubicado en OBUs y RSUs, y recibe peticiones de aplicaciones que se están ejecutando en computadoras conectadas a la unidad central del dispositivo. Estas aplicaciones conocidas como: aplicaciones de gestión de recursos (RMAs, Resource Management Applications), usan los recursos de una o más OBUs, y de las RSUs. El RM actúa como intermediario, transmitiendo comandos y respuestas entre las RMAs y las OBUs correspondientes. Una entidad de software dentro de la OBU, nombrada procesador de comandos de recursos (RCP, Resource Command Processor) ejecuta comandos enviados por el RM a petición de las RMAs.

Resumiendo la operación del RM se tiene que: cada RMA negocia con el RM la cantidad de recursos necesarios, luego el RM solicita estos recursos con la WME. Cuando la RMA está activa, el proveedor de recursos WME inicia la WBSS y anuncia que existe determina RMA

solicitando un conjunto de recursos. La WME de una OBU que esté recibiendo estos anuncios notifica al RCP acerca de los recursos solicitados por la RMA. Si existiera una coincidencia entre los recursos que han sido solicitados y los que este administra, el RCP solicita a la WME de la unidad, la unión al WBSS y el registro como usuario. Una vez que esto ocurra, el RCP responde directamente al RM. Luego el RM notifica a la RMA que se encuentra disponible una parte o todos los recursos solicitados. A partir de aquí comienza un intercambio entre la RMA y el RCP, que continua hasta que la RMA decide cerrar la sección usando los comandos necesarios. Entre los recursos que las RMAs pueden controlar están: lectura y escritura de memoria, interfaces de usuarios incluidas en las OBUs, interfaces especiales del equipamiento de exterior y dispositivos opcionales de seguridad vehicular que se localizan en las OBUs. Estos recursos están ubicados dentro del espacio de memoria de la unidad. Los comandos emitidos por el RM le permiten a las RMAs leer, escribir, reservar y liberar parte del espacio de memoria. El concepto de RM reduce la complejidad de las OBUs, liberándolas del requisito de ejecutar programas. Una manera sencilla de disminuir los costos de producción, aumentar la confiabilidad e interoperabilidad entre OBUs producidas por distintos fabricantes.

#### **1.4 Conclusiones parciales**

Las VANETs constituyen una de las tecnologías más importantes para el establecimiento de los futuros ITS. IEEE 802.11p es la alternativa con mayor número de seguidores para ser usado en redes VANETs, ya que fue diseñado para proveer comunicaciones robustas y de baja latencia en entornos móviles. IEEE 1609.4 extiende la capa MAC IEEE 802.11p para proveer operación multicanal. Estos protocolos definen el funcionamiento de la capa MAC y PHY en la arquitectura de red acceso inalámbrico en entornos vehiculares (WAVE). Las características particulares de las VANETs imponen retos en la comunicación, y por tanto, en el correcto funcionamiento de las aplicaciones de seguridad vial y gestión del tráfico. Los estándares IEEE 802.11p/1609.4 sustentan la habilidad de los sistemas vehiculares para preservar vidas humanas, siendo clave evaluar su desempeño para un futuro despliegue en entornos reales.

## **2. Modelo de movilidad, herramientas y escenarios de simulación VANETs**

### **2.1 Desafíos de simulación**

En la simulación de MANETs generalmente se utiliza la herramienta ns-2 [36] y el modelo de movilidad Random Way-Point, sin embargo, en las VANETs los simuladores propuestos por la comunidad científica son muy heterogéneos. La simulación de VANETs difiere en gran medida de la simulación tradicional de MANETs, debido a que el entorno vehicular impone nuevos aspectos y requerimientos, tales como: limitación del patrón de movimiento de los vehículos por infraestructura de la vía, alta movilidad, cambios frecuentes en la topología de red, la utilización de modelos de demanda de tráfico vehicular, distintos tipos de vehículos y variación en sus velocidades, señales de tránsito, obstáculos en la vía, comportamiento de los conductores, desvanecimiento multitrayecto, edificaciones que interfieren en las transmisiones de radio, entre otras. Estas particularidades hacen que las soluciones propuestas para MANETs difícilmente se apliquen a las VANETs.

En la simulación de VANETs se requiere que cada nodo sea tratado de forma particular. La mayoría de las herramientas propuestas para la simulación de VANETs presentan un modelo de tráfico microscópico que representa a los vehículos y sus interacciones con un alto nivel de detalle. En este modelo el comportamiento de un vehículo depende del estado de los vehículos vecinos e incluso de las características del conductor. La movilidad vehicular es uno de los aspectos claves que debe ser modelado con gran precisión. En las VANETs, el movimiento de los vehículos está restringido por la infraestructura de la carretera y depende de múltiples factores.

Las herramientas de simulación de VANETs de alta fidelidad aún presentan distintos grados de refinamiento. El primer nivel de complejidad está dado por la infraestructura vial. Esta se puede modelar ya sea mediante el uso de mapas del mundo real, o a través de la creación de una determinada topología en el propio simulador. Los mapas reales constituyen la opción que con mayor frecuencia aparece en las herramientas de simulación, y estos generalmente se obtienen del sitio OpenStreetMap [37] o TIGER [38]. El segundo nivel de complejidad en la definición de la topología del mapa se debe a la gestión de las intersecciones. Las señales de tráfico incluyendo los semáforos son muy importantes en esta área y tienen un fuerte impacto en la densidad vehicular. Estos mecanismos de control de tráfico reducen la velocidad promedio de los autos y crean grupos de vehículos, un aspecto muy importante cuando se

pretende evaluar el desempeño de aplicaciones y protocolos de control de acceso al medio (MAC).

El conductor también juega un papel esencial en el patrón de movilidad de un vehículo. El tiempo de percepción-reacción, el tiempo de frenado, la visibilidad y legibilidad de las señales de tránsito, el reconocimiento y la identificación de una situación peligrosa varían para cada conductor. Otro factor muy importante en la simulación de VANETs es la modelación del propio vehículo. Propiedades como el tamaño, límite de la aceleración y la velocidad máxima, resultan claves para reproducir lo más exactamente posible el entorno vehicular. Las reglas para el cambio de carril también están presentes en un modelo microscópico. Estas reglas generalmente dependen de atributos del conductor tales como la agresividad. Aunque el número de modelos de cambio de carril es amplio, la comunidad VANET coincide en el uso del modelo MOBIL [39].

Otro aspecto a tener en cuenta es la generación de vehículos en el escenario de prueba. La solución más sencilla de enfocar este problema consiste en colocar los automóviles de forma aleatoria en el mapa. Esto no es una suposición muy realista y requiere un cierto tiempo de experimentos antes de producir resultados válidos. Otro método consiste en proveer a cada vehículo un punto de inicio y un punto de destino, los cuales generalmente se basan en datos estadísticos macroscópicos. El último enfoque radica en generar vehículos para cada entrada del mapa siguiendo cierta distribución de progresos sobre la base de un volumen dado. Las distribuciones recomendadas en la teoría de tráfico son la distribución exponencial negativa y la distribución de Erlang. Soluciones similares se utilizan para describir la decisión que un conductor toma en una intersección de tráfico. La próxima carretera se elige de forma aleatoria o sobre la base de algún determinado algoritmo de trayectoria más corta cuando el destino es conocido.

El modelado del canal de comunicaciones también constituye un desafío en la simulación de VANETs. Una de las propiedades principales de los entornos vehiculares es la alta velocidad relativa que puede existir entre los nodos, por lo que se debe tener en cuenta el efecto Doppler. Otra característica importante proviene de la gran cantidad de obstáculos que pueden interferir con la propagación de las ondas de radio. Esto se ve agravado en el caso de un escenario urbano, donde los edificios y los árboles rodean la carretera, pero también se debe tener en cuenta para las autopistas, donde la interferencia puede provenir de túneles o de otros vehículos [40].

El método más común para manejar la propagación de las ondas radio en los simuladores de red, consiste en aplicar una serie de adiciones y sustracciones a la potencia de transmisión con el fin de calcular la potencia de la señal en el receptor. Después, esta potencia se compara con un determinado umbral y en función del resultado se decide si se acepta o no la trama. Es importante destacar el hecho de que el cálculo se realiza a nivel de trama y no de bit, y por lo general se usa la hipótesis de un ruido blanco Gaussiano aditivo. Esto se considera como una suposición razonable, que provee una buena compensación entre complejidad y precisión en

MANETs clásicas. No obstante, investigaciones recientes enfocadas a emular el canal de comunicación V2V [41] han mostrado diferencias importantes entre los resultados obtenidos usando este nivel de detalle con aquellos modelos más complejos, los cuales tratan los bits de forma individual.

El último desafío que se debe abordar en la simulación de VANETs es el elevado número de nodos que requieren ser modelados. Por lo general, el uso de memoria y consumo de CPU en los simuladores de red crece linealmente con el número de nodos. En las redes V2V, cada nodo transmite y recibe información, por lo tanto el intercambio de datos es elevado y el consumo de recursos crece considerablemente. Algunas aplicaciones previstas para las redes vehiculares deben funcionar a escala de una ciudad, requiriendo modelar más de 10 000 nodos. En el estudio de este tipo de situaciones es muy difícil usar el software de simulación actual.

## **2.2 Modelo de movilidad realista**

La auto-organización de las VANETs se construye a partir de vehículos que se desplazan a altas velocidades con grados de libertad limitados por la topología de la carretera. Estas particularidades hacen a menudo a los protocolos estándares de red ineficientes o inutilizables en este tipo de redes. El principal objetivo de los protocolos de comunicación desarrollados para redes ad-hoc vehiculares es garantizar el eficiente intercambio de información entre los nodos para proveer seguridad vial y/o evitar congestionamientos. Esto denota una fuerte interacción entre el modelo de comunicación y la movilidad vehicular. Tradicionalmente en la literatura científica se han descrito modelos de comunicación en los cuales el tráfico de datos se ve alterado por la movilidad. Sin embargo, en VANETs, la movilidad también puede estar influenciada por el tráfico de datos. Por tanto, existe una relación intrínseca entre la movilidad vehicular y la comunicación inalámbrica. Al tener en cuenta el alto impacto social asociado al despliegue de las tecnologías ITS, es comprensible el esfuerzo que se realiza en el desarrollo de aplicaciones, protocolos de comunicación y modelos de movilidad para redes vehiculares.

En la literatura, los modelos de movilidad vehicular son generalmente clasificados como: macroscópicos o microscópicos [15]. El enfoque macroscópico modela magnitudes de interés tales como: la densidad vehicular, velocidad media, tratamiento del tráfico de los vehículos según la dinámica de flujos, mientras que el enfoque microscópico considera a cada vehículo como una entidad distinta, modelando su comportamiento de una forma más precisa, pero mucho más costosa computacionalmente. Los modelos de movilidad frecuentemente incluyen los bloques funcionales siguientes: restricción de movimiento, generador de tráfico, el tiempo y las influencias externas. Por un lado, las restricciones de movimiento describen el grado relativo de libertad de cada vehículo. Macroscópicamente, las restricciones de movimiento son las calles y edificios, pero microscópicamente, son los vehículos vecinos, peatones, el tipo de auto o los hábitos del conductor. El generador de tráfico define diferentes tipos de vehículos y se encarga de sus interacciones según el entorno estudiado. Macroscópicamente, este modela

las densidades de tráfico vehicular, los flujos y velocidades, mientras que microscópicamente trata propiedades como: la distancia entre los vehículos, la aceleración, los adelantamientos y el frenado. El tiempo es el bloque funcional que representa diferentes configuraciones de movilidad para una hora específica del día o un cierto día de la semana. La influencia externa modela el impacto de un protocolo de comunicación u otra fuente de información sobre los patrones de movimiento de los vehículos.

De acuerdo con el mapa conceptual representado en la Figura 2.1, los modelos de movilidad que intentan generar patrones de movimiento vehicular realistas deben incluir los siguientes componentes:

- ❖ Mapas topológicos reales: las topologías de las carreteras deben presentar diferentes densidades de intersecciones, contener varios carriles, incluir distintos tipos de calles con sus límites de velocidad.
- ❖ Obstáculos: son objetos que restringen la movilidad de los vehículos y obstruyen las comunicaciones inalámbricas.
- ❖ Puntos de atracción/repulsión: los puntos de inicio y final de un viaje no son aleatorios. Los conductores, por lo general se desplazan hacia destinos similares, llamados puntos de atracción, o desde lugares iniciales similares, denominados puntos de repulsión. Esta característica crea embotellamientos.
- ❖ Características de los vehículos: cada vehículo tiene características particulares, las cuales impactan en los parámetros de tráfico. Por ejemplo, a nivel macroscópico, algunas carreteras urbanas y autopistas pueden estar prohibidas para los camiones durante ciertas horas del día. A nivel microscópico la aceleración, desaceleración y velocidad de un automóvil o camión difieren significativamente. La incorporación de estos aspectos en el generador de tráfico influye a la hora de modelar movimientos vehiculares realistas.
- ❖ Movimiento de viaje: a nivel macroscópico un viaje se puede definir como un conjunto de puntos fuentes y destinos en un área urbana. Los conductores pueden tener diversos intereses los cuales determinan sus selecciones de viajes.
- ❖ Movimiento de ruta: a nivel macroscópico una trayectoria se puede definir como el conjunto de segmentos de carretera que es recorrido por un vehículo entre un punto fuente y destino. En la vida real los conductores no escogen aleatoriamente la próxima vía cuando llegan a una intersección. Por el contrario, escogen sus trayectorias de acuerdo a un conjunto de aspectos tales como: distancia al lugar destino, limitaciones de velocidad, hora del día, congestión de las carreteras, hábito personal del conductor, entre otros.



### 2.2.1 Simulador de tráfico

Importantes estudios se han llevado a cabo con el objetivo de desarrollar modelos matemáticos o sintéticos que reflejen un efecto físico realista en la movilidad vehicular [42]. De acuerdo con [42], los modelos sintéticos se dividen en: modelos estocásticos los cuales comprenden todos los modelos que contienen movimientos puramente aleatorios, modelos de flujo de tráfico que representan a la movilidad vehicular como un fenómeno hidrodinámico, modelos de seguimiento de automóvil donde el comportamiento de cada conductor depende de los vehículos que están por delante, modelos de cola que modelan a las carreteras como colas FIFO (First In First Out) y a los automóviles como clientes, y modelos de comportamiento donde cada movimiento es definido por reglas de comportamiento, tales como las influencias sociales. La validación de un modelo matemático es un paso importante para garantizar su correspondencia con la movilidad real. Una solución es obtener trazas de movilidad a través de grandes campañas de medición y luego comparar sus patrones con aquellos desarrollados por los modelos sintéticos.

Algunas empresas o grupos de investigación han desarrollado simuladores de tráfico realistas mediante el perfeccionamiento de modelos sintéticos y su validación sobre la base de trazas reales y/o estudios de comportamiento. Implementados para la ingeniería de tráfico urbano, los simuladores: CORSIM [43], VISSIM [44], PARAMICS [45], TRANSIMS [46] y SUMO [47], son capaces de modelar tráfico vehicular microscópico, incluyendo el consumo de energía, la contaminación del medio ambiente y el monitoreo del nivel de ruido. Las trazas de salida de estos simuladores no pueden ser directamente usadas por los simuladores de red debido a que son incompatibles. Además, la mayoría de estos simuladores son productos comerciales y requieren la compra de una licencia. El principal inconveniente de usar un simulador de tráfico es la complejidad de configuración, que por lo general requiere modificar un gran número de parámetros. No obstante, el desarrollo de programas que proporcionan compatibilidad entre las trazas de salida de los simuladores de tráfico y las de entrada de los simuladores de red, posibilita que el usuario modele comunicaciones vehiculares en diferentes escenarios con un alto nivel de realismo.

### 2.2.2 Validación

En muchos trabajos, los autores asumen que sus modelos de movilidad sintéticos son realistas porque estos emplean modelos de comportamiento que están próximos a la realidad. Por ejemplo, un modelo de movilidad que simula una interacción microscópica entre vehículos usualmente se considera más realista que el modelo Random Way-Point. Sin embargo, este no puede ser directamente catalogado como realista ya que el único método que existe para medir el realismo se llama validación y consiste en comparar los patrones de movimientos obtenidos con los desarrollados en infraestructuras viales reales. Los simuladores de tráfico comerciales (CORSIM, VISSIM, etc.) y otros modelos de movilidad de código abierto como SUMO han

sido validados en base a trazas reales. En consecuencia, los modelos de movilidad incluidos en estas herramientas se consideran válidos.

### **2.3 Herramientas de simulación**

La evaluación de los protocolos IEEE 802.11p/1609.4 en entornos vehiculares se realiza a través del proyecto de comunicaciones vehiculares Veins que integra el simulador de red OMNeT++ y el simulador de tráfico realista SUMO. La herramienta MOVE se utiliza para configurar y generar el modelo de demanda tráfico vehicular. A continuación se describen los principales aspectos de estas herramientas.

#### **2.3.1 SUMO**

Simulación de Movilidad Urbana (SUMO, Simulation of Urban MObility) [47]: constituye una herramienta de código abierto para la simulación de tráfico vehicular. Está disponible para la mayoría de los sistemas operativos permitiendo desplegar casi todos los elementos que componen un escenario VANET realista. Incluye diferentes tipos de vehículos y modelos de movilidad, calles con límites de velocidad, carreteras multicarril, señales de tráfico e interfaz gráfica de usuario. Además puede gestionar escenarios con un elevado número de nodos e importar diferentes formatos de archivos de red, entre los que se encuentran: Visum, Vissim, ArcView o descripciones XML. A través de la combinación de SUMO y mapas descargados del sitio OpenStreetMap, es posible simular tráfico vehicular en diferentes zonas del planeta.

#### **2.3.2 MOVE**

Generador de modelos de Movilidad para redes ad-hoc Vehiculares (MOVE, MObility model generator for VEhicular networks) [48]: es un simulador de tráfico que permite generar modelos de movilidad realistas para simulaciones vehiculares. Está construido sobre SUMO facilitando su utilización por medio de una amigable y completa interfaz gráfica, además brinda la posibilidad de utilizar mapas generados por el usuario y también propone algunas topologías predefinidas como: las basadas en cuadrículas (grid), aleatorias (random) y con forma de telaraña (spider). Es compatible con los mapas TIGER y permite generar el patrón de movilidad vehicular de forma automática, o manualmente a través de un editor de movimiento del vehículo.

#### **2.3.3 OMNeT++**

Banco de prueba de Red Modular Objetivo en C ++ (OMNeT++, Objective Modular Network Testbed in C++) [49]: es un simulador de red de eventos discretos de código abierto basado en C++, altamente modular, escalable y bien estructurado. Provee la infraestructura necesaria para la utilización de diferentes proyectos de simulación los cuales tienen sus propios ciclos de lanzamiento. Se emplea principalmente para el modelado de redes alámbricas e inalámbricas, protocolos de comunicación, evaluación de aspectos de desempeño de sistemas de software

complejos y validación de arquitecturas de hardware. Es usado comúnmente por instituciones de investigación académicas, se ejecuta tanto en sistemas operativos Linux como Windows y contiene una ventana de líneas de comando así como una poderosa interfaz gráfica de usuario (GUI, Graphic User Interface).

#### **2.3.4 Veins**

Vehículos en Simulación de Red (Veins, Vehicles in Network Simulation) [24]: es un software de código abierto para la simulación de comunicaciones vehiculares que integra el simulador de red OMNeT++ y el simulador de tráfico SUMO. Incluye varias características que permiten a los usuarios realizar simulaciones VANETs con un alto grado de realismo, entre ellas están: comunicación bidireccional entre el simulador de tráfico y el simulador de red permitiendo el re-encaminamiento y re-configuración on-line de vehículos en reacción al intercambio de paquetes de red, uso de modelos de movilidad vehicular generados por la herramienta MOVE, implementación reciente de los protocolos IEEE 1609.4/802.11p [25], efectos de interferencia y ruido, así como el uso de mapas reales provenientes de OpenStreetMap [37] considerando a las edificaciones. Esta herramienta se encuentra disponible para sistemas operativos Windows y Linux.

### **2.4 Escenarios de simulación**

Un aspecto clave en la simulación de VANETs es el uso de un modelo de movilidad realista, y por ende, el empleo de mapas topológicos reales. Los mapas reales definen: estructura de las vías (unidireccional o bidireccional, un solo carril o multicarril), atributos de la vía (límites de velocidad, restricciones basadas en la clase del vehículo), presencia de señales de tránsito (señales de pare, ceda el paso, semáforos, etc.) y el efecto de la presencia de puntos de interés, los cuales intervienen en los patrones de movimiento de los vehículos. La topología de la carretera constituye un factor importante en la simulación de movilidad debido a que restringe el desplazamiento de los vehículos. Las topologías que se utilizan con mayor frecuencia en las simulaciones de comunicaciones vehiculares son: 1) Entorno urbano, contiene numerosas carreteras pequeñas y otras de mayor tamaño conocidas como vías principales, las cuales son continuamente interrumpidas por intersecciones conformando segmentos de menor longitud, y 2) Autopista, que constituye una sección de carretera comúnmente en solo sentido con uno o varios carriles con o sin intersecciones. En este trabajo, el desempeño de los protocolos IEEE 802.11p/1609.4 se evalúa en dos mapas reales de estas categorías, los cuales se describen en las secciones siguientes.

#### **2.2.3 Entorno urbano**

En este caso, como infraestructura vial se utiliza un entorno urbano, definido por una porción de mapa real de la ciudad estadounidense de Los Ángeles, cuya área es aproximadamente 1 Km<sup>2</sup>. La región presenta vías principales y secundarias, un alto número de intersecciones,

varios semáforos, cuadras con forma rectangular y carreteras con límites de velocidad de 60 Km/h. En la Figura 2.2 se muestra el escenario visto desde el sitio OpenStreetMap, mientras que en la Figura 2.3 se observa el entorno de simulación obtenido con SUMO. A través de la herramienta MOVE se definen en el escenario 7 flujos de vehículos, desplazándose cuatro de ellos por carreteras principales, los tres restantes por secundarias, con puntos de inicio y final representados en la Figura 2.2.

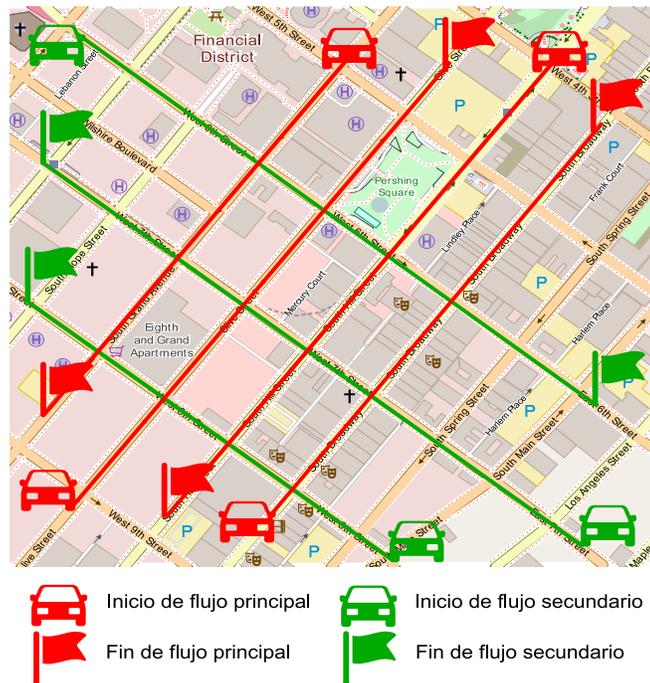


Figura 2.2: Porción de mapa real de la ciudad de Los Ángeles visto desde el sitio OpenStreetMap.

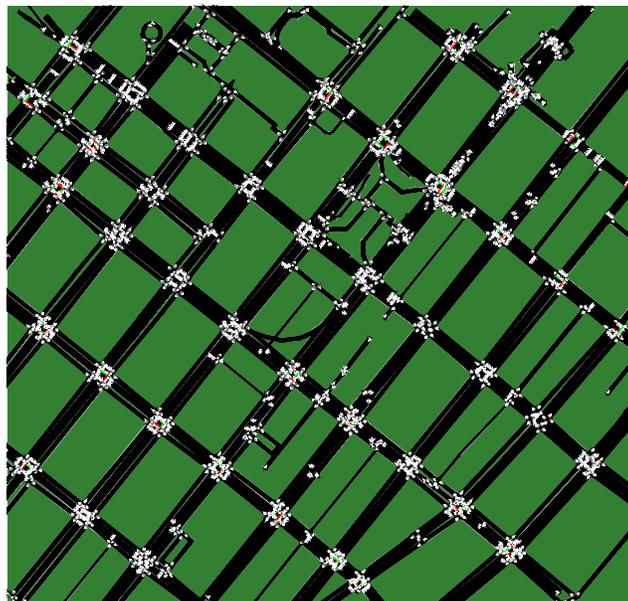


Figura 2.3: Porción de mapa real de la ciudad Los Ángeles visto desde SUMO.

Cada flujo primario (secundario) de tráfico vehicular está compuesto por 40 (20), 80 (40) y 120 (60) vehículos, generando para un tiempo de simulación igual a 1500 s las densidades de nodos siguientes: 30, 60 y 120 veh/Km<sup>2</sup>. Los vehículos que pertenecen al mismo flujo, se desplazan del origen al destino siguiendo igual trayectoria. De manera que, el modelo de demanda de tráfico consiste en el desplazamiento entre diferentes puntos del mapa, de flujos primarios y secundarios de tráfico, los cuales se interceptan y tienen distintas cantidades de nodos. En cada simulación, se usa un valor fijo de vehículos por flujo de tráfico primario y secundario, para generar cierta densidad de nodos. En la Tabla 2.1 se muestran los parámetros del escenario.

Tabla 2.1 Parámetros del entorno urbano Los Ángeles

Parámetro	Valor
Escenario	Mapa real de la ciudad Los Ángeles
Dimensiones del área	≈ 1 Km x 1 Km
Forma de la cuadra	Rectangular
Velocidad máxima de las vías	60 Km/h
Número de intersecciones	≈ 469
Número de semáforos	≈ 49
Número de flujos primarios	4
Número de flujos secundarios	3
Número de vehículos/flujo primario	40, 80, 120
Número de vehículos/flujo secundario	20, 40, 60
Tiempo de simulación	1500 s
Densidad de nodos	≈ 30, 60, 120 veh/Km <sup>2</sup>

#### 2.2.4 Entorno autopista

En este caso, como infraestructura vial se utiliza un entorno de autopista, definido por una porción de mapa real de la ciudad alemana de Engelskirchen, cuya área es aproximadamente 3 Km<sup>2</sup>. El escenario presenta un segmento de carretera con una longitud cercana a los 3.2 Km y velocidad máxima de 300 Km/h, donde existen cuatro carriles estando dos de ellos en una dirección y los dos restantes en sentido contrario. En la Figura 2.4 se muestra el escenario visto desde el sitio OpenStreetMap, mientras que en la Figura 2.5 se observa el entorno de simulación obtenido con SUMO.

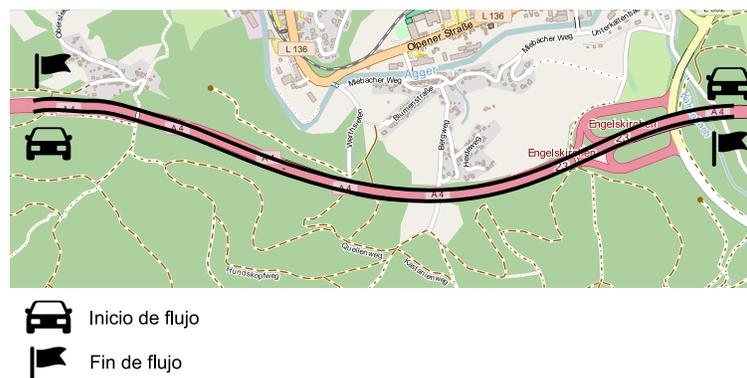


Figura 2.4: Entorno de autopista Engelskirchen visto desde el sitio OpenStreetMap.

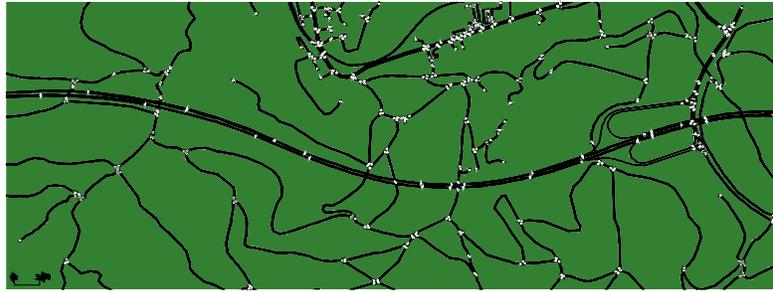


Figura 2.5: Entorno de autopista Engelskirchen visto desde SUMO.

A través de la herramienta MOVE se definen en el escenario dos flujos de vehículos, cuyos puntos de inicio y final se representan en la Figura 2.4. Cada flujo presenta 100 vehículos, de modo que el modelo de demanda de tráfico consiste en dos flujos de vehículos, que circulan por vías paralelas uno al encuentro del otro, se cruzan y alejan nuevamente. La velocidad máxima de los vehículos se limita en cada simulación a 100, 150 y 200 Km/h, presentando las mismas una duración de 500 s. En la Tabla 2.2 se muestran los principales parámetros del escenario.

Tabla 2.2 Parámetros del entorno de autopista Engelskirchen

Parámetro	Valor
Escenario	Mapa real de la ciudad de Engelskirchen
Dimensiones del área	≈ 3 Km x 1 Km
Longitud de la carretera principal	≈ 3.2 Km
Velocidad máxima de la carretera principal	300 Km/h
Número de flujos	2 (En sentido contrario)
Número de vehículos/flujo	100
Velocidad máxima de los vehículos	100, 150, 200 Km/h
Tiempo de simulación	500 s

## 2.5 Parámetros de simulación

Todos los vehículos implicados en las simulaciones están equipados con tecnología WAVE presentando a nivel MAC y PHY la implementación de los protocolos IEEE 1609.4 /802.11p descrita en [25]. Esto proporciona una razón de penetración del mercado igual a 100%. En los experimentos donde no se utiliza la conmutación sincrónica de canal definida por el estándar 1609.4, los dispositivos de comunicación inalámbrica de los vehículos operan solamente en el canal de control (CCH 178), cuya frecuencia central y ancho de banda son: 5.89 GHz y 10 MHz respectivamente. En los experimentos donde se utiliza la conmutación sincrónica de canal, los vehículos sintonizan durante: 50 ms el canal de control (CCH 178) y 50 ms el canal de servicio uno (SCH 174), siendo la frecuencia central y ancho de banda de este último: 5.87 GHz y 10 MHz respectivamente. Por simplicidad, se considera que la implementación de la arquitectura de red WAVE de cada nodo, solo incluye las capas: PHY, MAC y de servicios de red, de modo que a los datos generados únicamente se les agregan los encabezados de la capa MAC y PHY. Los vehículos transmiten la información en el canal de control (CCH) con una

potencia igual a 12.23 mW (inferior al valor máximo permitido) y presentan una sensibilidad de  $-82$  dBm, acorde a las variantes de transmisión de IEEE 802.11 para canales de 10 MHz. Esto en combinación con el uso del modelo de radiopropagación de pérdida de trayectoria simple (SimplePathlossModel) y un exponente de pérdida ( $\alpha$ ) igual a 2, produce un rango de comunicación de 500 m. A nivel PHY se utiliza una modulación QPSK, razón de codificación 1/2, lo cual en canales de 10 MHz de ancho de banda proporciona una razón de datos igual a 6 Mbit/s.

Tabla 2.3 Parámetros utilizados en las simulaciones

Parámetro	Valor
Frecuencia central CCH (CH 178)	5.890 GHz
Frecuencia central SCH1 (CH 174)	5.870 GHz
Ancho de banda del canal	10 MHz
Razón de transmisión de datos	6 Mbits/s
Potencia de Transmisión	12.24 mW
Sensibilidad del receptor	- 82 dBm
Ruido térmico	- 110 dBm
MAC - PHY	IEEE 1609.4/802.11p
Mecanismo de elección de trama (Veins)	Decider80211p
Intervalo CCH/SCH	50 ms
Intervalo de Guarda	4 ms
aCWmín – aCWmáx	3 - 1023
Tiempo de una ranura	13 $\mu$ s
SIFS	32 $\mu$ s
Tamaño de beacon	500, 800 Bytes
Razón de beacon	1, 5, 10 beacon/s
Prioridad de beacon	AC_3, AC_2, AC_1, AC_0
Tipo de antena	Omnidireccional
Posición de la antena	Parte superior frontal del vehículo
Altura del vehículo	1.5 m
Largo del vehículo	5 m
Ancho del vehículo	2 m
Velocidad máxima del vehículo	56 m/s (200 Km/h)
Aceleración máxima del vehículo	4.5 m/s <sup>2</sup>
Desaceleración máxima del vehículo	6.5 m/s <sup>2</sup>
Modelo de movilidad vehicular	CarFollowing-Krauss
Espacio vacío después del líder (minGap)	2.5 m
Imperfección del conductor ( $\sigma$ )	0.5
Índice de penetración	1 (100 %)
Modelo de radio propagación	(SimplePathlossModel) $\alpha = 2$

En las VANETs, el conocimiento cooperativo constituye la base de múltiples aplicaciones de seguridad vial y gestión del tráfico, por esto, el modo de comunicación empleado en los experimentos consiste en el intercambio periódico de mensajes de difusión de un salto (beacons). Se utilizan las razones de beacons siguientes: 1, 5 y 10 beacons/s, que están dentro del rango especificado para los servicios básicos de conocimiento cooperativo [17]. Como los beacons se transmiten en modo broadcast, la ausencia de acuses de recibo hace que no exista crecimiento exponencial de la ventana de contención, siendo el parámetro CWmín de cada categoría de tráfico quien define el límite máximo para el contador de backoff. Los beacons se

establecen de los tamaños siguientes: 500 y 800 bytes, pues en las comunicaciones vehiculares los mensajes relacionados con la seguridad vial presentan un tamaño relativamente grande debido a la presencia de información asociada a la seguridad de red [50]. Cada vehículo tiene 5 m de longitud, 2 m de ancho, 1.5 m de altura, 56 m/s como límite de velocidad,  $4.5 \text{ m/s}^2$  de aceleración y  $6.5 \text{ m/s}^2$  de desaceleración, se considera una imperfección del conductor ( $\sigma$ ) de 0.5, un espacio vacío después del líder (minGap) de 2.5 m y la movilidad vehicular se simula con el modelo realista de seguimiento de automóvil de Krauss (CarFollowing-Krauss). Las antenas tienen una ganancia igual a 0 dB, y están ubicadas en la parte superior frontal de los vehículos.

## 2.6 Métricas de desempeño

Existen diferentes métricas para evaluar el desempeño de una comunicación basada en la difusión periódica de mensajes de un salto. En este trabajo, el desempeño de los protocolos IEEE 802.11p/1609.4 se evalúa en función de las métricas que se describen a continuación:

*Número de colisiones (NC)*: es la cantidad de colisiones que ocurren debido a la expiración simultánea de los contadores de backoff. Cuando dos o más transceptores inalámbricos no se detectan y transmiten paquetes simultáneamente, causan colisión en el área de alcance común a los distintos remitentes.

*Probabilidad de recepción exitosa de paquetes ( $P_r$ )*: se define como la razón que existe entre el número total de paquetes recibidos en el escenario dividido el total de paquetes enviados.

*Demora de extremo a extremo (DEE)*: se define como el tiempo que consume un paquete en viajar desde el transmisor hasta el receptor.

*Error de posición máximo real percibido (EPMReal)*: es el error de posición máximo que un vehículo computa respecto a sus vecinos, incluyendo el efecto de las colisiones y asumiendo que el evento de búsqueda de posición está uniformemente distribuido en el intervalo de tiempo inherente a la recepción de los beacons.

## 2.7 Conclusiones parciales

La simulación de VANETs difiere en gran medida de la simulación de MANETs, debido a que el entorno vehicular impone nuevos aspectos y requerimientos. El principal objetivo de las aplicaciones vehiculares es proporcionar seguridad vial alertando al conductor del peligro o controlando al vehículo. Esto denota una fuerte interacción entre el modelo de comunicación y la movilidad vehicular. Para lograr una simulación vehicular realista se debe usar un modelo de movilidad microscópico que modele a los vehículos y sus interacciones con un alto nivel de detalle. Los simuladores de comunicaciones vehiculares que acoplan bidireccionalmente un simulador de tráfico y un simulador de red, constituyen en la actualidad los más utilizados por la comunidad científica para evaluar el desempeño de protocolos de comunicación en mapas reales.

### 3. Desempeño de los protocolos IEEE 802.11p/1609.4 en entornos VANETs

#### 3.1 Tamaño de la ventana de contención (CW)

En la Figura 3.1 se muestra el número de colisiones (NC) que como promedio se producen en cada nodo del escenario en función de la densidad vehicular para cada ventana de contención (CW), en el entorno urbano Los Ángeles. La Figura 3.1 a) es para una razón de 1 beacon/s, la Figura 3.1 b) para 5 beacon/s y la Figura 3.1 c) para 10 beacon/s. En las gráficas se observa que con un aumento en la razón de beacon y la densidad de tráfico vehicular, crece el número de colisiones de paquetes para las distintas ventanas de contención. La menor cantidad de colisiones se obtiene para la ventana de contención más grande  $CW = 1023$ , mientras que con la ventana de contención correspondiente en IEEE 802.11p a la categoría de acceso de mayor prioridad AC3 ( $CW = 3$ ), se afecta en mayor medida el desempeño del sistema. Esto evidencia que una menor ventana de contención eleva la probabilidad de que dos nodos transmitan al mismo tiempo, es decir, se sincronizan con mayor frecuencia los procesos de backoff, lo que se traduce en un mayor número de colisiones, sobre todo en escenarios con una alta densidad de vehículos.

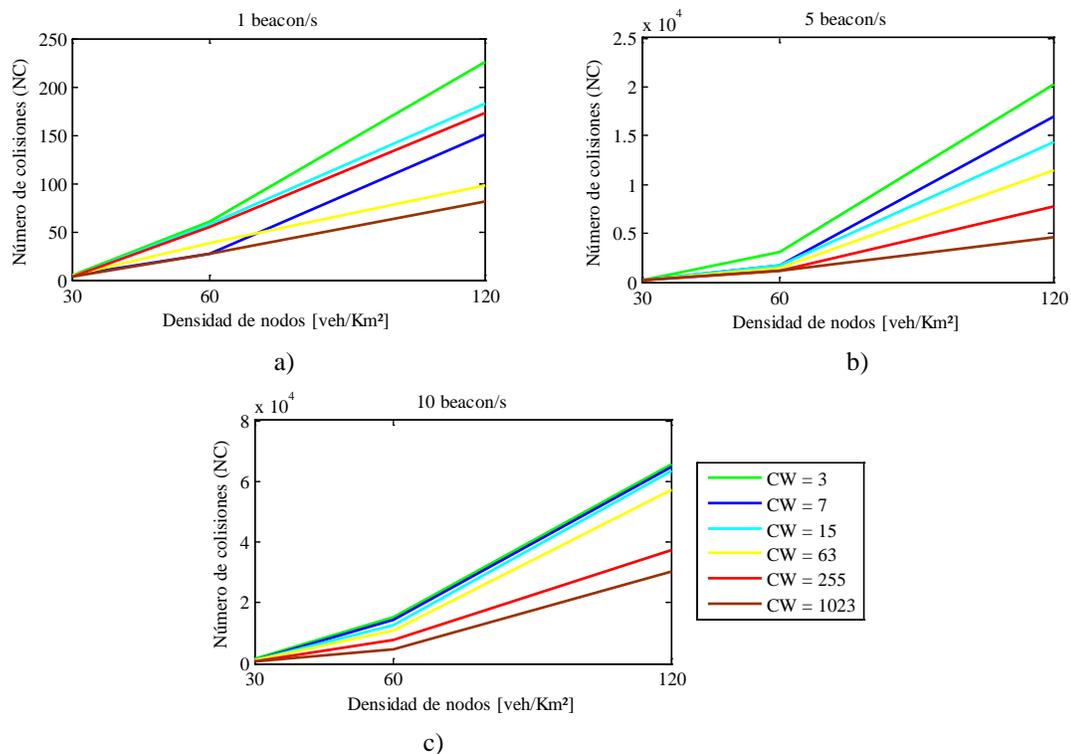


Figura 3.1: Número de colisiones de paquetes (NC) en función de la densidad de nodos para el entorno urbano Los Ángeles, a) 1 beacon/s, b) 5 beacon/s, c) 10 beacon/s.

En la Figura 3.2 se muestra la probabilidad de recepción exitosa ( $P_r$ ) en función de la densidad vehicular para cada valor de ventana de contención (CW), en el entorno urbano Los Ángeles. La Figura 3.2 a) es para una razón de 1 beacon/s, la Figura 3.2 b) para 5 beacon/s y la Figura 3.2 c) para 10 beacon/s. En las tres gráficas se observa que a medida que aumenta la razón de beacon y la densidad de tráfico vehicular, decrece la probabilidad de recepción exitosa para las distintas ventanas de contención. Los valores más bajos de probabilidad de recepción exitosa se obtienen para las ventanas de contención más pequeñas, mientras que con un incremento en la razón de beacon y la densidad de tráfico vehicular, las ventanas de contención más grandes afectan en menor medida el desempeño de la red.

De acuerdo con la Figura 3.2 a), cuando se transmite 1 beacon/s y existen aproximadamente 30 veh/Km<sup>2</sup>, la probabilidad de recepción exitosa es superior a 0.99 para cada ventana de contención, cumpliendo con los requerimientos de las aplicaciones críticas de seguridad vial. Para las densidades de 60 y 120 veh/Km<sup>2</sup>, solo las CW = 7, 63 y 1023, proporcionan una probabilidad de recepción exitosa superior o cercana a 0.99, mientras que con los otros valores de ventanas de contención se satisfacen los requerimientos de las aplicaciones vehiculares menos exigentes, donde para un correcto funcionamiento la probabilidad de recepción puede caer por debajo de 0.99.

En la Figura 3.2 b) se observa de manera más clara el impacto del tamaño de la ventana de contención sobre el desempeño del sistema, sobre todo cuando la densidad vehicular alcanza los 120 veh/Km<sup>2</sup>. El aumento de la razón a 5 beacons/s y de la densidad a 60 veh/Km<sup>2</sup>, hacen que para la ventana de contención CW = 3, correspondiente en IEEE 802.11p a la clase de tráfico de voz (AC3), o sea, la de mayor prioridad, la probabilidad de recepción exitosa no exceda a 0.9. Sin embargo, con los tamaños de ventana de contención correspondientes a las otras clases de tráfico (AC2, AC1 y AC0), la probabilidad de recepción exitosa sobrepasa el valor de 0.9. Aquí, existe una diferencia en la probabilidad de recepción exitosa cercana al 10 % para la mayor y menor ventana de contención (CW = 1023 y 3). Si la densidad de nodos se incrementa hasta 120 veh/Km<sup>2</sup>, solo la ventana de contención CW = 1023 proporciona una probabilidad de recepción exitosa superior a 0.9. En este caso, se produce una diferencia en la probabilidad de recepción exitosa entre la mayor y menor ventana de contención de un 32 %.

En la Figura 3.2 c) se muestra que para una razón de 10 beacon/s, la probabilidad de recepción cae abruptamente con un aumento de la densidad de tráfico vehicular. De modo que, para 60 veh/Km<sup>2</sup> solo la ventana de contención CW = 1023 provee una probabilidad de recepción exitosa próxima a 0.9. En estas condiciones, la probabilidad de recepción exitosa decrece en un 30 % si se utiliza la ventana de contención CW = 3. Cuando existen en el escenario 120 veh/Km<sup>2</sup>, la probabilidad de recepción exitosa no sobrepasa el valor de 0.8 para ninguna de las ventanas de contención. Aquí, para las ventanas de contención CW ≤ 63, la probabilidad de recepción exitosa no excede a 0.5, indicando que se pierde más de la mitad del total de beacons enviados en el escenario. Es importante notar que existe una diferencia próxima al

50 % en la probabilidad de recepción exitosa entre la mayor y menor ventana de contención (CW = 1023 y 3).

Los resultados de simulación de la Figura 3.2 reflejan que para aumentar la probabilidad de recepción exitosa en un entorno urbano donde existe un número muy elevado de vehículos compartiendo el canal de comunicación, se debe disminuir la cantidad de beacon por segundo transmitida al medio.

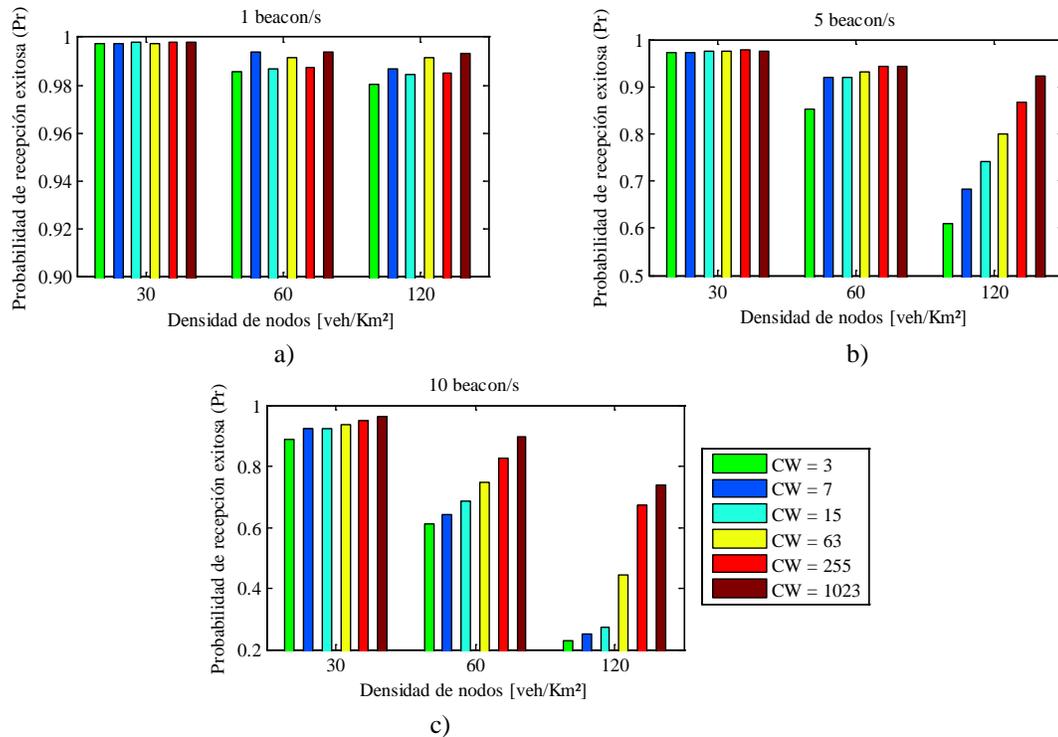


Figura 3.2: Probabilidad de recepción exitosa (Pr) en función de la densidad de nodos para el entorno urbano Los Ángeles, a) 1 beacon/s, b) 5 beacon/s, c) 10 beacon/s.

En la Figura 3.3 se muestra la demora de extremo a extremo (DEE) promedio que sufren los beacons en función de la densidad vehicular para cada valor de ventana de contención (CW), en el entorno urbano Los Ángeles. La Figura 3.3 a) es para una razón de 1 beacon/s, la Figura 3.3 b) para 5 beacon/s y la Figura 3.3 c) para 10 beacon/s. En las tres gráficas se observa que a medida que aumenta la razón de beacon y la densidad de tráfico vehicular, crece la demora de extremo a extremo que experimentan los beacons para las distintas ventanas de contención, obteniéndose los valores más bajos de demora para las ventanas de contención más pequeñas. Para una razón de hasta 10 beacon/s, y una densidad de nodos máxima de 120 veh/Km², las ventanas de contención  $CW \leq 255$  proveen una demora de extremo a extremo que no excede los 20 ms. Este valor está muy por debajo de los 100 ms que se especifican como límite para la correcta operación de las aplicaciones críticas de seguridad vial y los sistemas cooperativos en tiempo real. Para una ventana de contención  $CW = 1023$ , la demora de extremo a extremo

alcanza los 3 s, rebasando ampliamente los 500 ms definidos como límite para las aplicaciones no relacionadas a la seguridad vial.

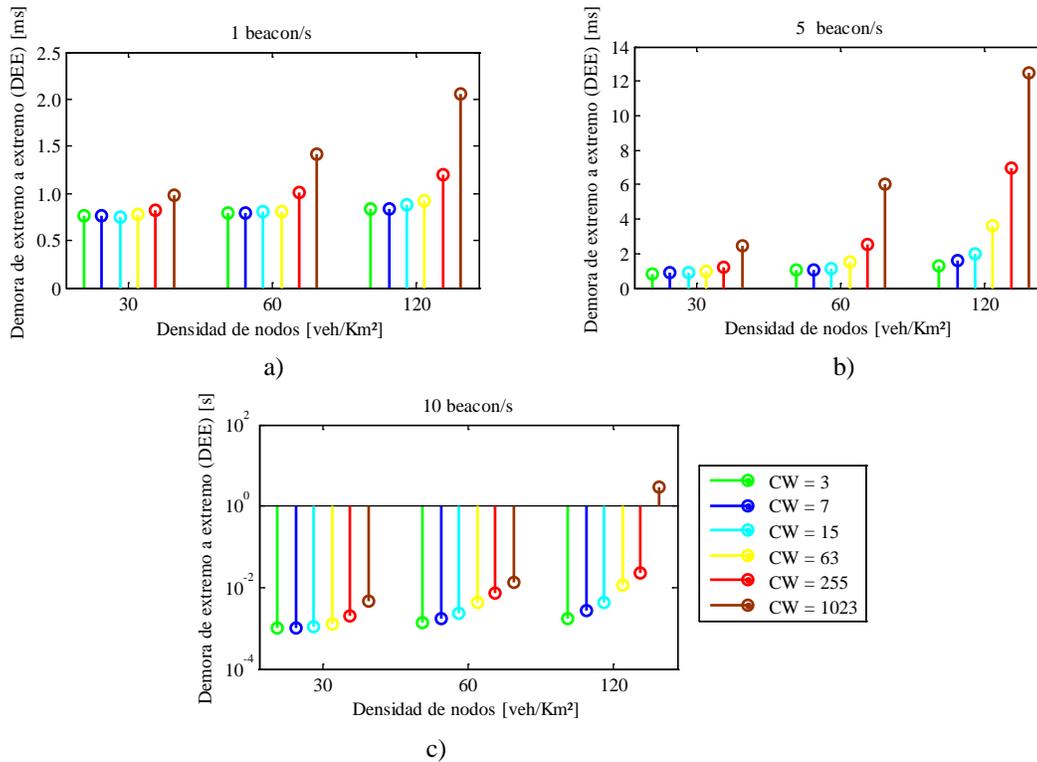


Figura 3.3: Demora de extremo a extremo (DEE) en función de la densidad de nodos para el entorno urbano Los Ángeles, a) 1 beacon/s, b) 5 beacon/s, c) 10 beacon/s.

En la Figura 3.4 se muestra el error de posición máximo (EPM) que como promedio percibe un nodo de los autos circundantes, según la densidad vehicular y el tamaño de la ventana de contención (CW), en el entorno urbano Los Ángeles. La Figura 3.4 a) es para una razón de 1 beacon/s, la Figura 3.4 b) para 5 beacon/s y la Figura 3.4 c) para 10 beacon/s. En las gráficas se observa que un incremento en la razón de beacon y la densidad de tráfico vehicular, tiende a disminuir el error de posición máximo para las distintas ventanas de contención. No obstante, cuando se transmiten 10 beacon/s, el aumento de la densidad de nodos tiende a elevar el error de posición máximo para las ventanas de contención  $CW \leq 63$ . Esto ocurre porque, a pesar de que un incremento en la densidad de nodos reduce la velocidad promedio de los vehículos disminuyendo el error de posición, una alta carga en el canal de comunicaciones conduce a un mayor número de colisiones de paquete, resultando en una menor probabilidad de recepción exitosa, lo que se traduce en un mayor error de posición percibido, sobre todo para ventanas de contención más pequeñas.

Según la Figura 3.4 a) cuando se transmite 1 beacon/s, no existe una diferencia significativa en el error de posición máximo provisto por las distintas ventanas de contención. Para una densidad de 60 veh/Km<sup>2</sup>, el error de posición máximo no está por debajo de los 5 m definidos

como límite para el correcto funcionamiento de las aplicaciones de conducción cooperativa. El incremento de la densidad hasta 120 veh/Km<sup>2</sup>, todavía no es suficiente para que la reducción de velocidad experimentada por los vehículos produzca un error de posición máximo inferior a 1m, que es el límite establecido para que las aplicaciones críticas de seguridad vial se ejecuten correctamente.

En la Figura 3.4 b) se observa que para una razón igual a 5 beacon/s y una densidad de 120 veh/Km<sup>2</sup>, solo las ventanas de contención  $CW \geq 15$ , producen un error de posición máximo inferior o igual a 1m. Sin embargo, con todas las ventanas de contención se obtiene un error de posición máximo inferior a 1.4 m.

En la Figura 3.4 c) se muestra que para una razón de 10 beacon/s, las ventanas de contención  $CW \geq 63$ , proveen un error de posición máximo cercano o inferior a 0.7 m para las distintas densidades de nodos. No obstante, con la ventana de contención más pequeña  $CW = 3$ , el error de posición no supera los 1.3 m.

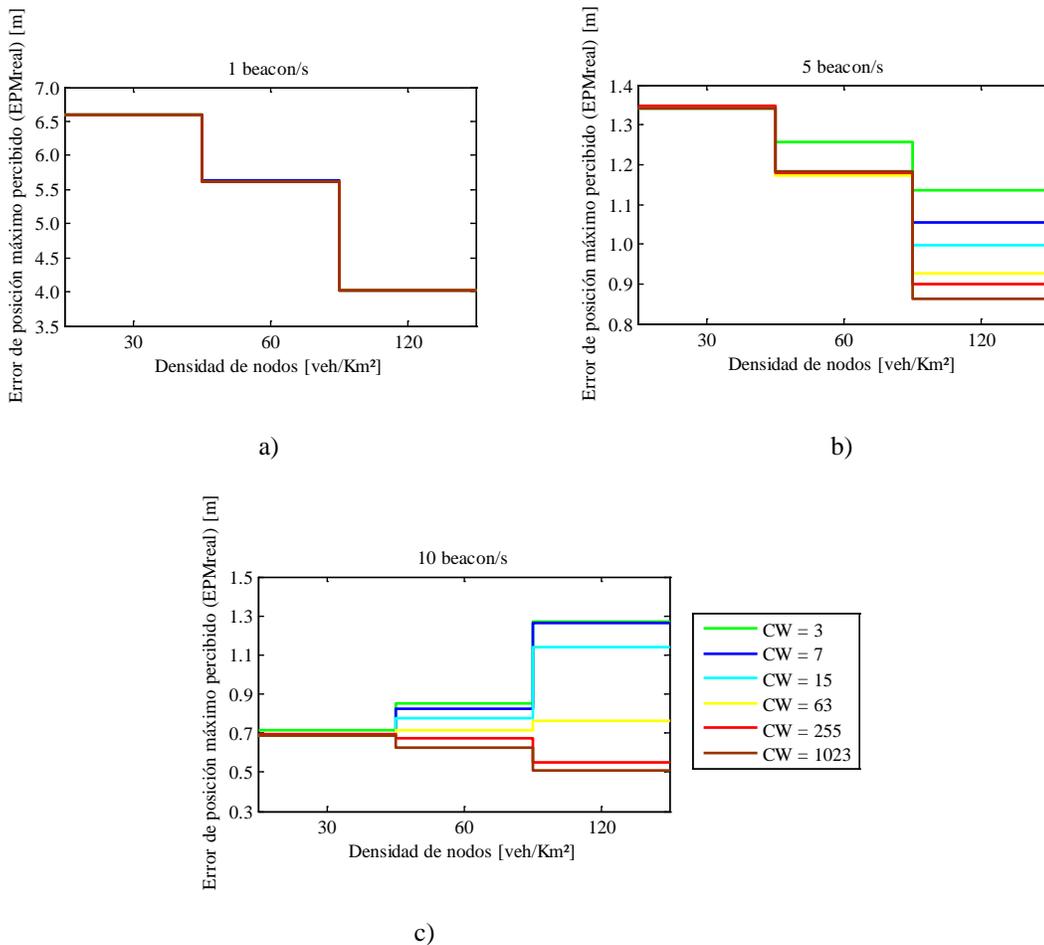


Figura 3.4: Error de posición máximo percibido (EPM) en función de la densidad de nodos para el entorno urbano Los Ángeles, a) 1 beacon/s, b) 5 beacon/s, c) 10 beacon/s.

La Figura 3.5 muestra el número de colisiones (NC) en función de la velocidad desarrollada por los vehículos para cada valor de ventana de contención (CW), en el entorno de autopista Engelskirchen. La Figura 3.5 a) es para 1 beacon/s, la Figura 3.5 b) para 5 beacon/s y la Figura 3.5 c) para 10 beacon/s. Los entornos de autopista, a diferencia de los urbanos, generalmente presentan un número no muy elevado de vehículos que se desplazan a altas velocidades. Si en los entornos urbanos lo común es que exista una alta densidad de nodos y una baja velocidad promedio, aquí con frecuencia sucede lo contrario, es decir, existe una baja densidad de nodos y una alta velocidad promedio. En las gráficas se observa que con un aumento en la razón de beacon, crece el número de colisiones de paquetes para las distintas ventanas de contención. Sin embargo, para una misma razón de beacon el incremento de la velocidad de los vehículos causa el efecto contrario, o sea, reduce el número de colisiones de paquetes para las distintas ventanas de contención. Para velocidades entre 100 y 150 Km/h, el número de colisiones de paquetes más alto se obtiene para la ventana de contención más pequeña  $CW = 3$ , y el más bajo para la ventana de contención más grande  $CW = 1023$ . La disminución de la densidad de nodos causada por un aumento de la velocidad vehicular, hace que para 200 Km/h las ventanas de contención produzcan un número de colisiones similar, sobre todo para altas razones de beacons.

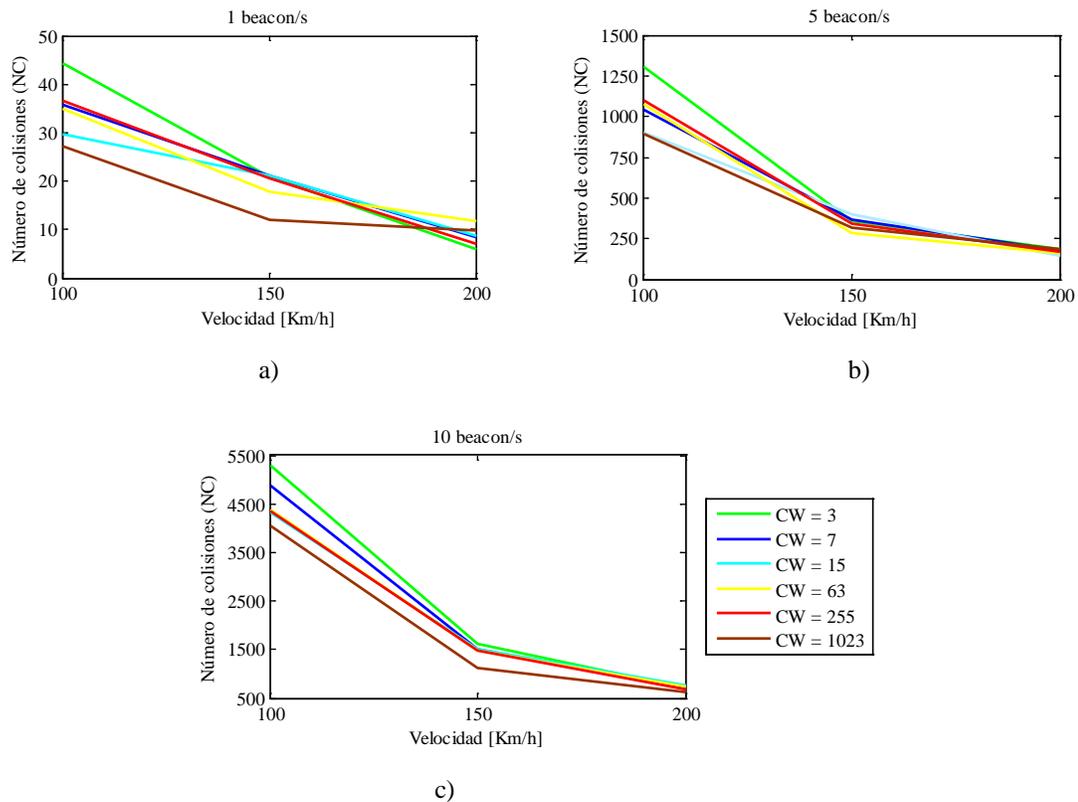


Figura 3.5: Número de colisiones de paquetes (NC) en función de la velocidad de los nodos para el entorno de autopista Engelskirchen, a) 1 beacon/s, b) 5 beacon/s, c) 10 beacon/s.

La Figura 3.6 muestra la probabilidad de recepción exitosa ( $P_r$ ) en función de la velocidad de los vehículos para las ventanas de contención (CW), en el entorno de autopista Engelskirchen. La Figura 3.6 a) es para una razón de 1 beacon/s, la Figura 3.6 b) para 5 beacon/s y la Figura 3.6 c) para 10 beacon/s. En las gráficas se observa que con un aumento de la razón de beacon, disminuye la probabilidad de recepción exitosa para las distintas ventanas de contención. No obstante, para una misma razón de beacon, un aumento en la velocidad de los vehículos, eleva la probabilidad de recepción exitosa para las diferentes ventanas de contención. Esto se debe a que una reducción en la densidad vehicular, disminuye la carga en el canal de comunicaciones, provocando un menor número de colisiones de paquetes, y por tanto, una mayor probabilidad de recepción exitosa. En la Figura 3.6 a) se observa que para 1 beacon/s, no hay una diferencia significativa en la probabilidad de recepción exitosa que proveen las ventanas de contención, obteniéndose valores cercanos al límite de 0.99 especificado para un correcto funcionamiento de las aplicaciones críticas de seguridad vial. Según la Figura 3.6 b), para 5 beacon/s y una velocidad de 100 Km/h, la probabilidad de recepción exitosa no excede a 0.9 para ninguna ventana de contención, mientras que para 200 Km/h no se sobrepasa el 95 %. En la Figura 3.6 c) se aprecia que el aumento de la razón a 10 beacon/s, hace que la probabilidad de recepción exitosa no exceda a 0.87 para ninguna ventana de contención. Nótese que, en el entorno de autopista, la baja densidad de vehículos producida por una elevada velocidad, hace que no se observe de forma clara el impacto del valor de la ventana de contención sobre la probabilidad de recepción exitosa.

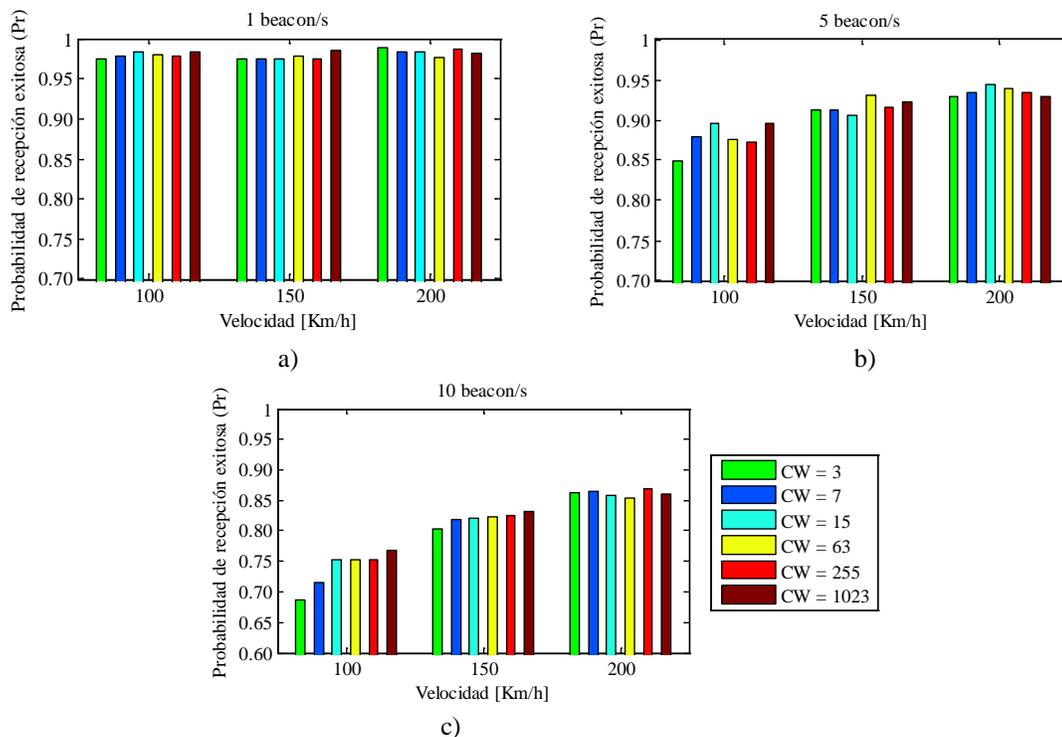


Figura 3.6: Probabilidad de recepción exitosa ( $P_r$ ) en función de la velocidad de los nodos para el entorno de autopista Engelskirchen, a) 1 beacon/s, b) 5 beacon/s, c) 10 beacon/s.

En la Figura 3.7 se muestra la demora de extremo a extremo (DEE) promedio que sufren los beacons en función de la velocidad de los vehículos para las ventanas de contención (CW), en el entorno de autopista Engelskirchen. La Figura 3.7 a) es para 1 beacon/s, la Figura 3.7 b) para 5 beacon/s y la Figura 3.7 c) para 10 beacon/s. En las gráficas se observa que a medida que aumenta la razón de beacon, crece la demora de extremo a extremo que experimentan los beacons para las distintas ventanas de contención, y que para una razón de beacon, el aumento de la velocidad reduce la demora de extremo a extremo. Los valores más altos de demora se experimentan con la ventana de contención más grande (CW = 1023), y los más bajos con la ventana más pequeña (CW = 3). En ningún caso, la demora de extremo a extremo excede los 7 ms, valor que está muy por debajo de los 100 ms que definen el correcto funcionamiento de las aplicaciones críticas de seguridad vial, y de los 500 ms de las aplicaciones no relacionadas a la seguridad vial.

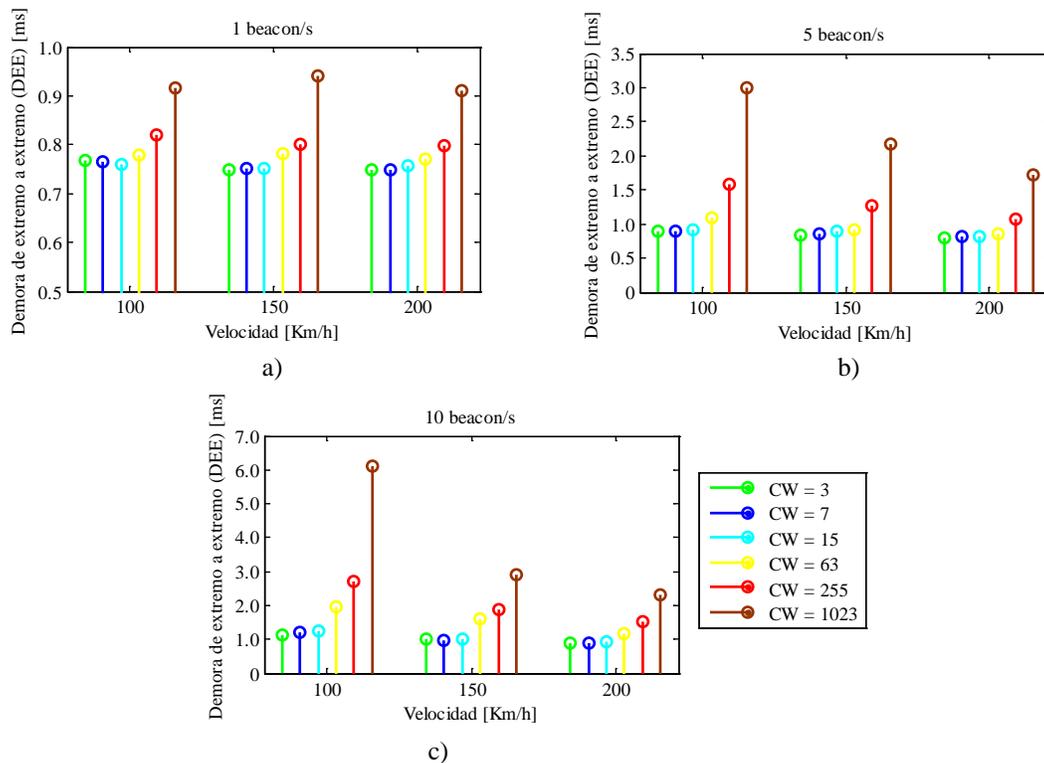


Figura 3.7: Demora de extremo a extremo (DEE) en función de la velocidad de los nodos para el entorno de autopista Engelskirchen, a) 1 beacon/s, b) 5 beacon/s, c) 10 beacon/s.

En la Figura 3.8 se muestra el error de posición máximo (EPM) percibido en función de la velocidad de los vehículos para las distintas ventanas de contención (CW), en el entorno de autopista Engelskirchen. La Figura 3.8 a) es para 1 beacon/s, la Figura 3.8 b) para 5 beacon/s y la Figura 3.8 c) para 10 beacon/s. En las gráficas se observa que un incremento en la razón de beacon, tiende a disminuir el error de posición máximo para los distintos valores de ventanas de contención. No obstante, el incremento de la velocidad tiende a elevarlo. El valor de la

ventana de contención no presenta un impacto significativo en el error de posición máximo percibido por los vehículos circundantes, sobre todo a bajas razones de beacons, obteniéndose una diferencia que no excede en el peor caso los 0.5 m. En la Figura 3.8 a) se observa que para 1 beacon/s, el error de posición máximo alcanza los 27 m para 100 Km/h, y los 52 m para 200 Km/h. Estos valores están muy alejados de los límites definidos para un correcto desempeño de las aplicaciones vehiculares. En la Figura 3.8 b) se aprecia que para 5 beacon/s, el error de posición máximo rebasa los 5 m para 100 Km/h, y los 10 m para 200 Km/h, es decir, todavía no se cumple con los requerimientos de las aplicaciones. En la Figura 3.8 c) se observa que para 10 beacon/s, el error de posición máximo no excede los 5 m, solo para velocidades que no superan los 150 Km/h.

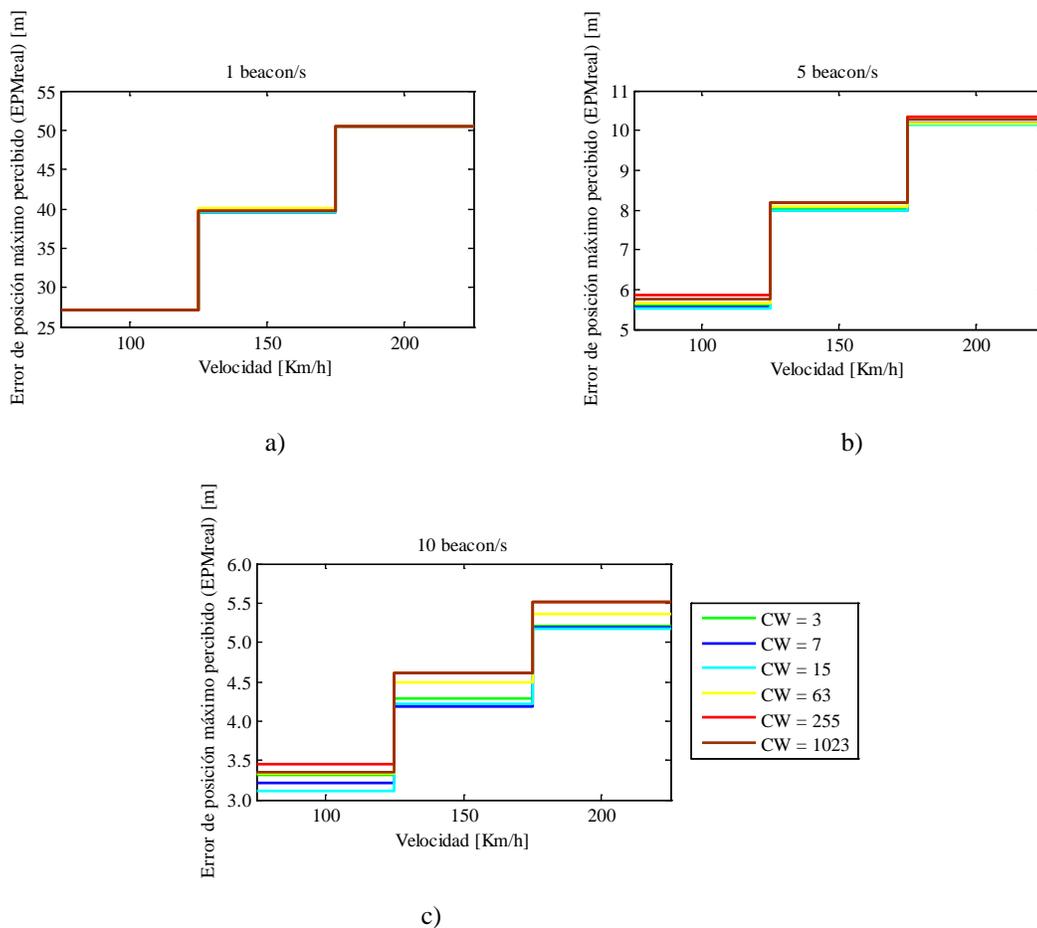


Figura 3.8: Error de posición máximo percibido (EPM) en función de la velocidad de los nodos para el entorno de autopista Engelskirchen, a) 1 beacon/s, b) 5 beacon/s, c) 10 beacon/s.

### 3.2 Conmutación sincrónica de canal (1609.4)

En la Figura 3.9 se muestran los resultados de simulación obtenidos en el entorno urbano Los Ángeles para las distintas métricas, cuando se utiliza una razón de 5 beacons/s, ventanas de contención CW entre 3 y 1023, una densidad vehicular de 60 veh/Km<sup>2</sup> y con la habilitación o

no de la conmutación sincrónica de canal especificada por el estándar IEEE 1609.4. La inspección de los resultados revela que el uso de la conmutación sincrónica de canal impacta de manera significativa en el desempeño del sistema. Con respecto al número de colisiones de paquetes, ver Figura 3.9 a), el uso de la conmutación sincrónica de canal (línea azul) produce en cada nodo 500 colisiones más que cuando no está habilitado el funcionamiento del protocolo 1609.4 (línea roja), para la ventana de contención correspondiente a la categoría de acceso de mayor prioridad ( $CW = 3$ ), y cerca de 300 colisiones de paquetes más para la ventana de contención  $CW = 1023$ . En la Figura 3.9 b) se observa que para todas las ventanas de contención, el uso de la conmutación sincrónica de canal afecta el desempeño del sistema, disminuyendo la probabilidad de recepción exitosa. Para la ventana de contención  $CW = 3$ , la probabilidad de recepción exitosa decrece en un 3 %, mientras que para la ventana de contención  $CW = 1023$  en 1.5 %. En la Figura 3.9 c) se observa que el uso de la conmutación sincrónica de canal aumenta la demora experimentada por los paquetes en 2 ms para la ventana de contención  $CW = 3$ , y en 12 ms para  $CW = 1023$ . En la Figura 3.9 d) se observa que en estas condiciones, el uso de la conmutación sincrónica de canal no afecta en gran medida la exactitud de posición del sistema. No obstante, el uso de IEEE 1609.4 produce un error de posición superior al obtenido cuando los nodos sintonizan todo el tiempo el canal de control.

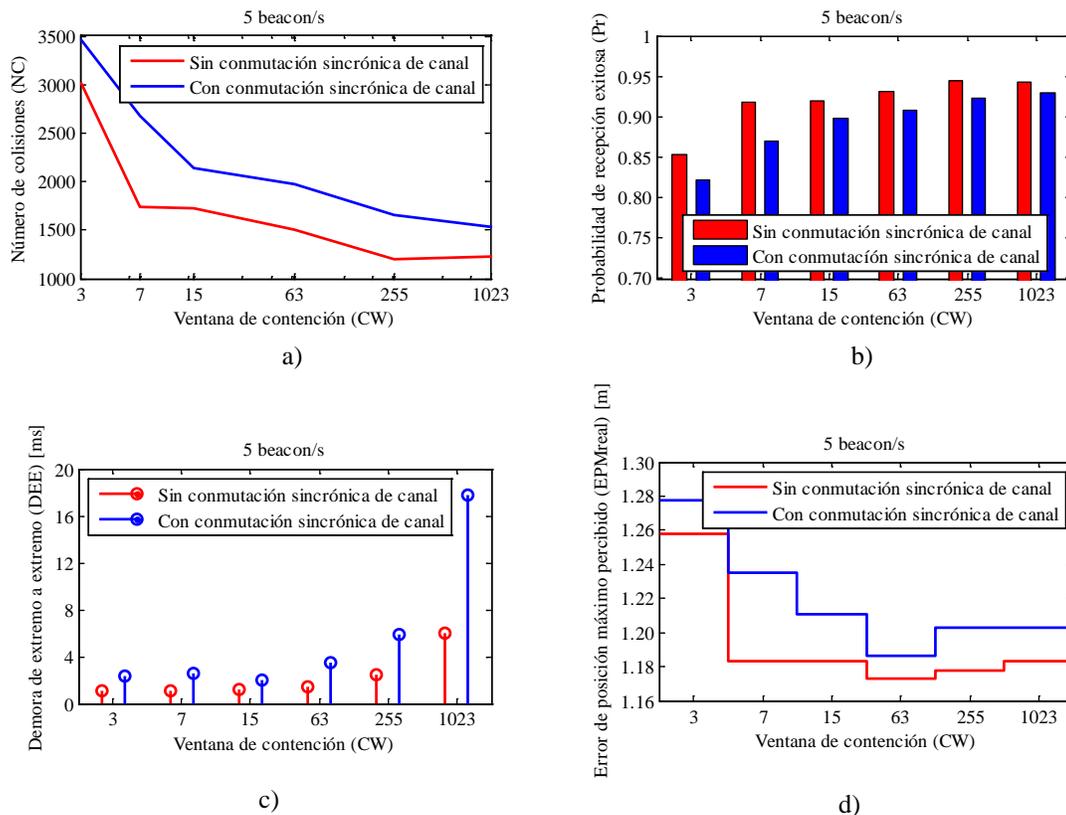


Figura 3.9: Entorno urbano Los Ángeles (60 veh/Km<sup>2</sup>, beacon de 512 bytes), a) Probabilidad de recepción exitosa (Pr), b) Número de colisiones (NC), c) Demora de extremo a extremo (DEE), d) Error de posición máximo percibido (EPMreal).

La Figura 3.10 visualiza los resultados de simulación obtenidos en el entorno de autopista Engelskirchen para las distintas métricas, cuando se utiliza una razón de 5 beacons/s, ventanas de contención CW entre 3 y 1023, velocidad vehicular de 150 Km/h y con la habilitación o no de la conmutación sincrónica de canal especificada por el estándar IEEE 1609.4. Aquí, al igual que en el entorno urbano, el uso de la conmutación sincrónica de canal deteriora el desempeño del sistema, aunque en menor medida debido a la baja densidad de nodos que caracteriza a las autopistas. En la Figura 3.10 a), se observa que la conmutación sincrónica de canal produce en el sistema aproximadamente 30 colisiones de paquetes más para la ventana de contención CW = 15 (mejor caso), y cerca de 150 colisiones más para CW = 7 (peor caso). De acuerdo con la Figura 3.10 b), la probabilidad de recepción exitosa cae cerca de un 4 % para la ventana de contención CW = 7, cuando se utiliza el estándar IEEE 1609.4. En la Figura 3.10 c), se observa que la demora de extremo a extremo que experimentan los beacons es 4 ms superior cuando se implementa la conmutación sincrónica de canal. Aunque en el error de posición máximo el impacto no es significativo, la Figura 3.10 d) evidencia que el uso del estándar IEEE 1609.4 tiende a reducir la exactitud del sistema.

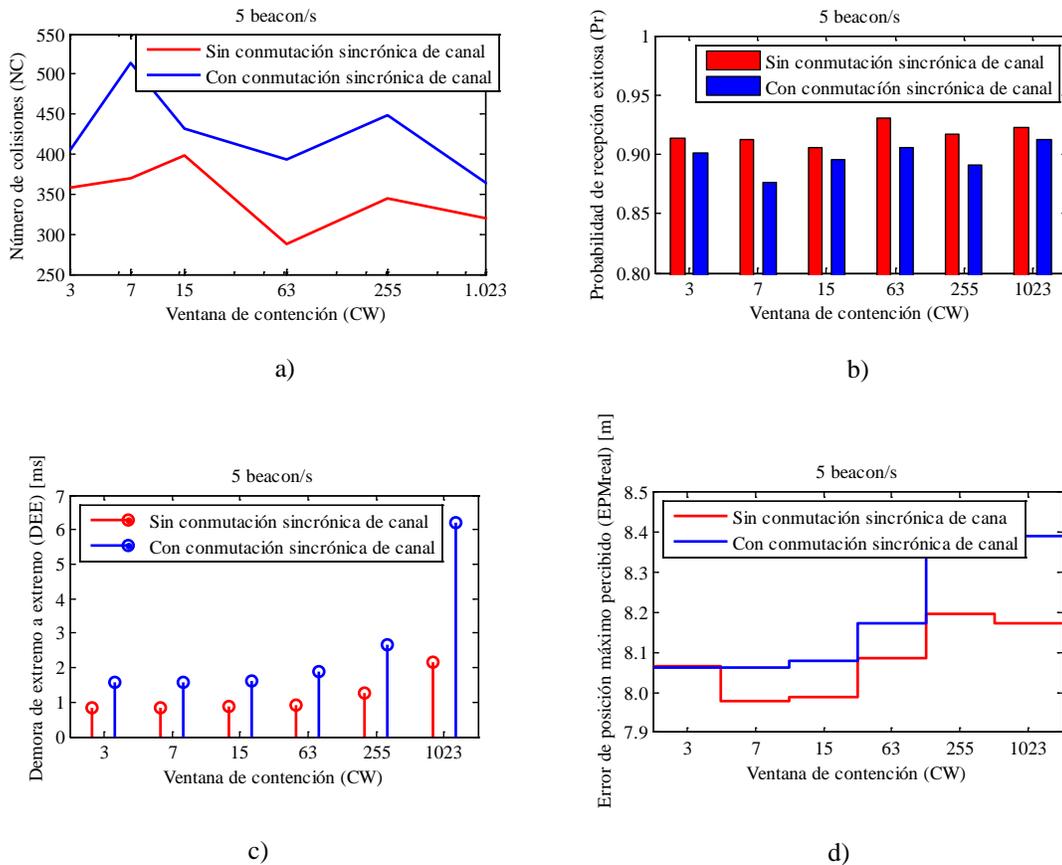


Figura 3.10: Entorno de autopista Engelskirchen (150 Km/h, beacon de 512 bytes), a) Probabilidad de recepción exitosa (Pr), b) Número de colisiones (NC), c) Demora de extremo a extremo (DEE), d) Error de posición máximo percibido (EPMreal).

### 3.3 Tamaño de los mensajes de difusión de un salto

En la Figura 3.11 se muestra el número de colisiones (NC) que como promedio ocurren en un nodo del entorno urbano Los Ángeles en función del tamaño del beacon, para 1 y 10 beacon/s, con la habilitación o no de la conmutación sincrónica de canal especificada por el estándar IEEE 1609.4. En las dos graficas se observa que un incremento en el tamaño del beacon decrementa el desempeño del sistema sin importar el uso o no del protocolo IEEE 1609.4. En la Figura 3.11 a), se aprecia que un aumento de 288 bytes en el tamaño del beacon eleva el número de colisiones en 8, mientras que en la Figura 3.11 b) se observa que se incrementa en 200.

En la Figura 3.12 se visualiza la probabilidad de recepción exitosa ( $P_r$ ) en función del tamaño de beacon para 1 y 10 beacon/s, en el entorno urbano Los Ángeles, cuando se utiliza o no el estándar IEEE 1609.4. El aumento del tamaño del beacon reduce la probabilidad de recepción exitosa, sobre todo para altas razones de beacon. Esto se observa en la Figura 3.12 b), donde un incremento de 288 bytes en el tamaño del beacon, reduce la probabilidad de recepción exitosa en aproximadamente un 10 %, cuando no está habilitada la conmutación sincrónica de canal.

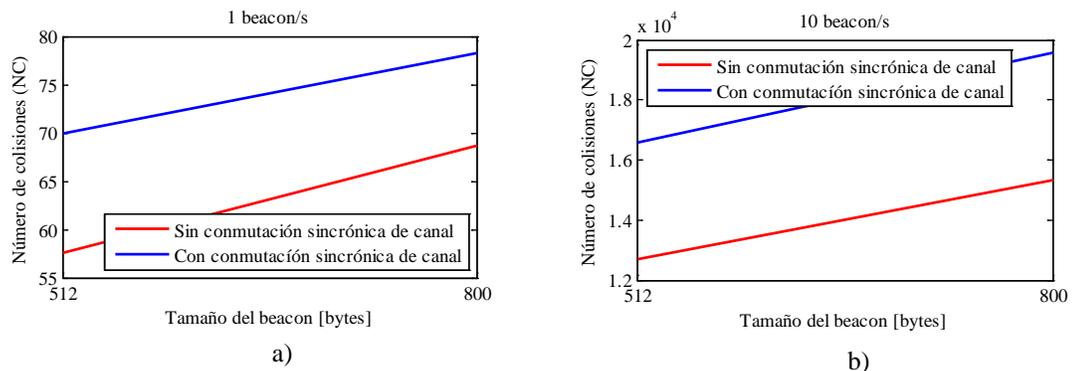


Figura 3.11: Número de colisiones (NC) de paquetes en función del tamaño de beacon en el entorno urbano Los Ángeles, a) 1 beacon/s, b) 10 beacon/s.

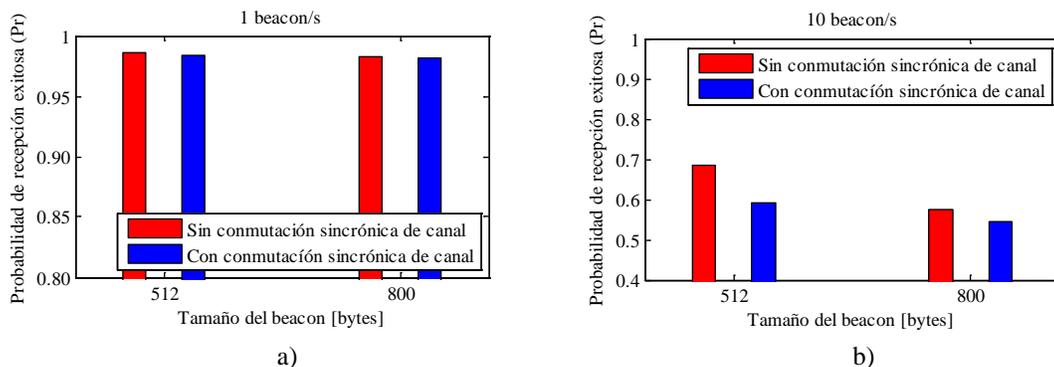


Figura 3.12: Probabilidad de recepción exitosa ( $P_r$ ) en función del tamaño de beacon en el entorno urbano Los Ángeles, a) 1 beacon/s, b) 10 beacon/s.

En la Figura 3.13 se muestra la demora de extremo a extremo (DEE) que experimentan los beacons en función de su tamaño, para una razón de 1 y 10 beacon/s, con la habilitación o no de la conmutación sincrónica de canal especificada por el estándar IEEE 1609.4, en el entorno urbano Los Ángeles. Se observa que un incremento en el tamaño del beacon, eleva la demora de extremo a extremo sin importar si se utiliza o no la conmutación sincrónica de canal. Aquí un incremento de 288 bytes en el tamaño del beacon, aumenta la demora como mínimo en 1 ms.

En la Figura 3.14 se visualiza el error de posición máximo (EPM) que perciben los vehículos vecinos, en función del tamaño de beacon para 1 y 10 beacon/s, cuando se usa o no el estándar IEEE 1609.4, en el entorno urbano Los Ángeles. En este caso, el incremento del tamaño de beacon no afecta de manera significativa la exactitud de posición del sistema, obteniéndose en el peor de los casos, una diferencia en el error de posición máximo percibido que no sobrepasa los 0.1 m.

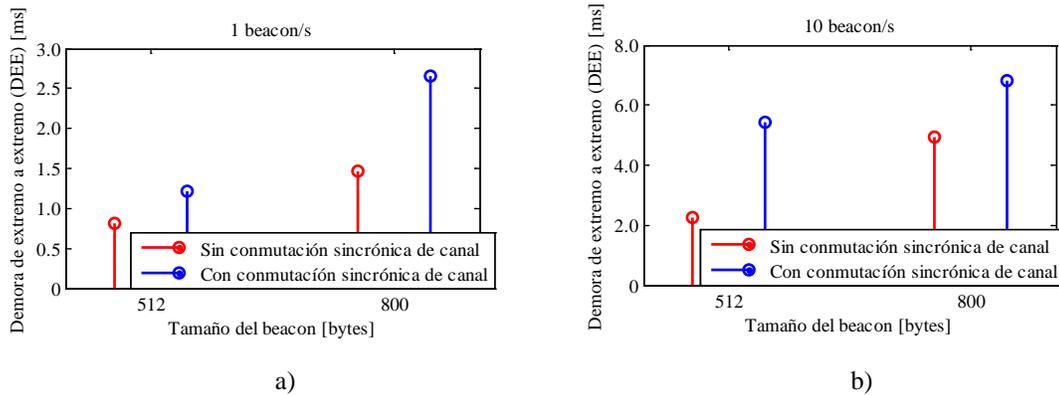


Figura 3.13: Demora de extremo a extremo (DEE) en función del tamaño de beacon en el entorno urbano Los Ángeles, a) 1 beacon/s, b) 10 beacon/s.

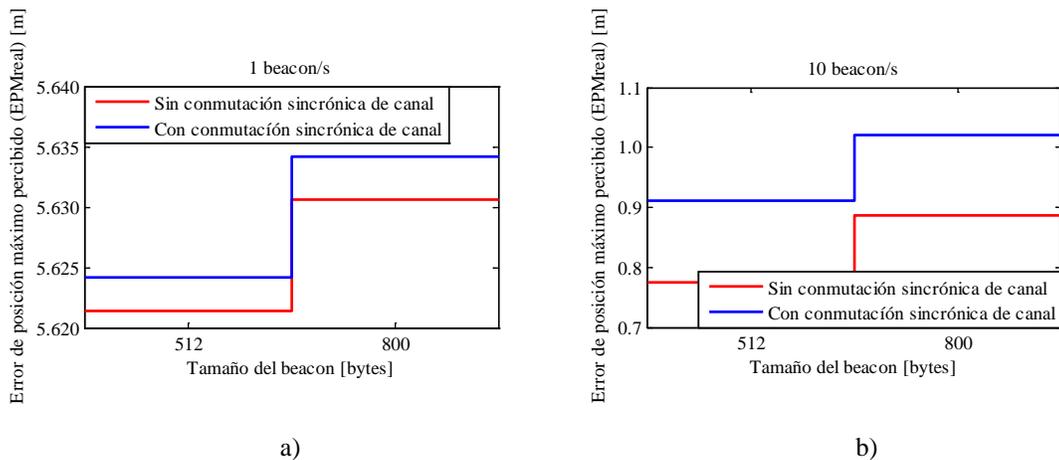


Figura 3.14: Error de posición máximo percibido (EPMreal) en función del tamaño de beacon en el entorno urbano Los Ángeles, a) 1 beacon/s, b) 10 beacon/s.

En la Figura 3.15 se muestra el número de colisiones (NC) que como promedio ocurren en un nodo del entorno de autopista Engelskirchen en función del tamaño del beacon, para 1 y 10 beacon/s, con la habilitación o no de la conmutación sincrónica de canal especificada por el estándar IEEE 1609.4. En las gráficas se observa que un incremento en el tamaño del beacon, eleva el número de colisiones de paquetes sin importar el uso o no del protocolo IEEE 1609.4. En la Figura 3.15 a), se aprecia que en el mejor caso, un aumento de 288 bytes en el tamaño del beacon eleva el número de colisiones en 6, mientras que en la Figura 3.15 b) se observa que se eleva en 500.

En la Figura 3.16 se visualiza la probabilidad de recepción exitosa ( $P_r$ ) en función del tamaño de beacon para 1 y 10 beacon/s, para el entorno de autopista Engelskirchen, cuando se usa o no el estándar IEEE 1609.4. El aumento del tamaño del beacon disminuye la probabilidad de recepción exitosa. Esto se aprecia de forma más clara cuando se transmiten 10 beacon/s. En la Figura 3.16 b), se observa que un incremento de 288 bytes en el tamaño del beacon, reduce la probabilidad de recepción exitosa cerca de un 6 %, cuando no está habilitada la conmutación sincrónica de canal.

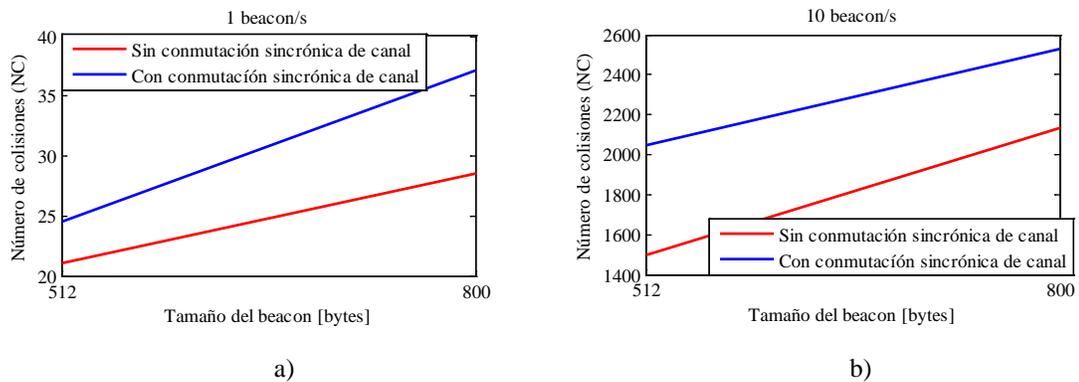


Figura 3.15: Número de colisiones (NC) de paquetes en función del tamaño de beacon en el entorno de autopista Engelskirchen, a) 1 beacon/s, b) 10 beacon/s.

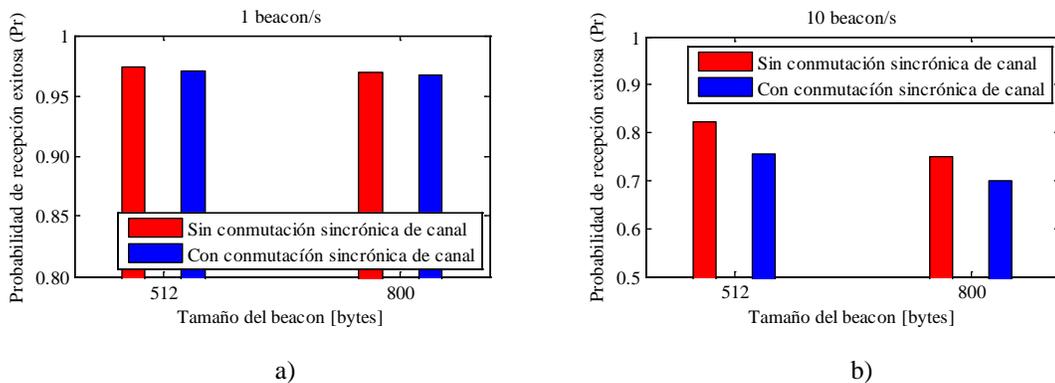


Figura 3.16: Probabilidad de recepción exitosa ( $P_r$ ) en función del tamaño de beacon en el entorno de autopista Engelskirchen, a) 1 beacon/s, b) 10 beacon/s.

En la Figura 3.17 se muestra la demora de extremo a extremo (DEE) que experimentan los beacons en función de su tamaño, para una razón de 1 y 10 beacon/s, con la habilitación o no de la conmutación sincrónica de canal especificada por el estándar IEEE 1609.4, en el entorno de autopista Engelskirchen. Aquí, al igual que en el entorno urbano, un incremento en el tamaño del beacon, eleva la demora sin importar si se utiliza o no la conmutación sincrónica de canal. Adicionarle 288 bytes al tamaño del beacon, eleva la demora como mínimo en 0.8 ms, para 10 beacon/s.

En la Figura 3.18 se visualiza el error de posición máximo (EPM) que perciben los vehículos vecinos, en función del tamaño de beacon para 1 y 10 beacon/s, cuando se usa o no el estándar IEEE 1609.4, en el entorno de autopista Engelskirchen. En este caso, el incremento del tamaño de beacon impacta de manera significativa en el error de posición que perciben los vehículos circundantes, sobre todo a bajas razones de beacon. En la Figura 3.18 a) se observa que la adición de 288 bytes al tamaño del beacon, incrementa el error de posición máximo percibido en 1 m.

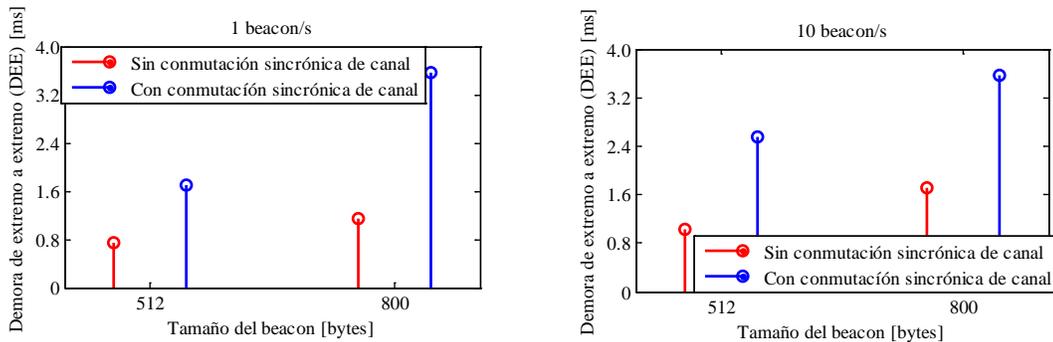


Figura 3.17: Demora de extremo a extremo (DEE) en función del tamaño de beacon en el entorno de autopista Engelskirchen, a) 1 beacon/s, b) 10 beacon/s.

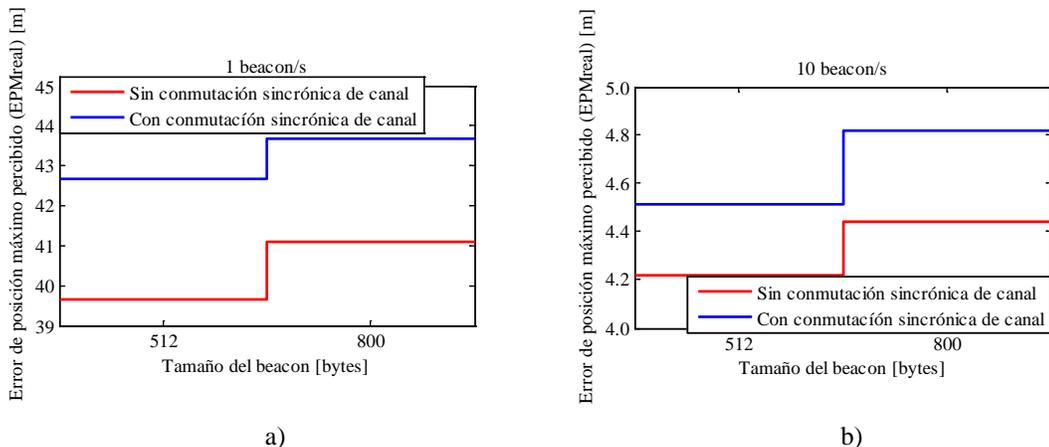


Figura 3.18: Error de posición máximo percibido (EPMreal) en función del tamaño de beacon en el entorno de autopista Engelskirchen, a) 1 beacon/s, b) 10 beacon/s.

### **3.4 Conclusiones parciales**

Los resultados de los experimentos demuestran que en el estándar IEEE 802.11p, un aumento en la razón de beacon y la densidad de tráfico vehicular, eleva el número de colisiones de paquetes para las distintas ventanas de contención, disminuyendo la probabilidad de recepción exitosa, lo que atenta contra el correcto funcionamiento de las aplicaciones. Las ventanas de contención más pequeñas producen una menor demora de extremo a extremo, sin embargo, sufren un mayor número de colisiones de paquetes, y por tanto, una menor probabilidad de recepción exitosa. Esto ocurre especialmente en escenarios donde existen altas densidades de nodos y razones de beacons. La conmutación sincrónica de canal definida por el estándar IEEE 1609.4 impacta negativamente en el desempeño de las aplicaciones de seguridad vial. Para todas las ventanas de contención, el uso de la conmutación sincrónica de canal, reduce la probabilidad de recepción exitosa. Por último, un aumento en el tamaño del beacon deteriora el desempeño del sistema sin importar si se usa o no, la conmutación sincrónica de canal del protocolo IEEE 1609.4.

# CONCLUSIONES

Con la realización de la investigación se arribaron a las conclusiones siguientes:

- 1) El mecanismo EDCA de 802.11p provee QoS a través de la utilización de cuatro categorías de acceso por cada canal CCH o SCH. Las ACs, se relacionan con cuatro clases de tráfico y cada una presenta una cola y un proceso de contención independiente.
- 2) El protocolo IEEE 1609.4 complementa el funcionamiento de la capa MAC IEEE 802.11p para proporcionar coordinación entre los múltiples canales del espectro. Este proceso conocido como conmutación sincrónica de canal permite que en los sistemas WAVE se ejecuten simultáneamente aplicaciones relacionadas o no con la seguridad vial.
- 3) Con los modelos de movilidad realistas es posible simular comunicaciones vehiculares con gran precisión, modelando a los vehículos y sus interacciones con un alto nivel de detalle, sobre mapas topológicos reales y usando flujos vehiculares de tráfico basados en puntos de atracción-repulsión.
- 4) Para la etapa de simulación fue seleccionada la herramienta Veins, que integra el simulador de red OMNeT++ y el simulador de tráfico vehicular SUMO, debido a que es un simulador realista donde la información de red puede impactar sobre el patrón de movilidad de los nodos.
- 5) Las pruebas experimentales definidas para evaluar el desempeño de los protocolos IEEE 802.11p/1609.4, fueron diseñadas de manera tal que permitieron determinar la incidencia de diferentes parámetros sobre el funcionamiento de las aplicaciones de seguridad vial, concluyendo que:
  - a) El mecanismo de acceso al canal de los sistemas IEEE 802.11 en su variante DCF es un procedimiento asincrónico que no gestiona con gran eficiencia los recursos del medio inalámbrico, especialmente en los casos donde se transmite en modo broadcast, con altas razones de transmisión de beacons y existen altas densidades de nodos.
  - b) En escenarios con alta densidad de vehículos, las categorías de acceso de IEEE 802.11p que tienen las ventanas de contención más pequeñas, sufren una menor

- demora. No obstante, pueden producir un incremento en el número de colisiones de paquetes, disminuyendo la probabilidad de recepción exitosa, lo que atenta contra el correcto desempeño de las aplicaciones de seguridad vial.
- c) El mecanismo de conmutación sincrónica de canal definido por IEEE 1609.4 conduce a un mayor número de expiraciones simultáneas de los contadores de backoff, lo que atenta contra el correcto funcionamiento de las aplicaciones vehiculares.
  - d) El uso del protocolo IEEE 1609.4 en las comunicaciones vehiculares, degrada el desempeño del sistema, reduciendo significativamente la probabilidad de recepción exitosa de paquetes, sobre todo en escenarios con altas densidades de nodos y razones de beacons.
  - e) El incremento en el tamaño del beacon decrementa el desempeño del sistema, en especial cuando existen altas densidades de nodos, sin importar el uso o no de la conmutación sincrónica de canal definida por el protocolo IEEE 1609.4.
  - f) Con IEEE 802.11p, para aumentar la probabilidad de recepción exitosa en un entorno urbano donde existe un número muy alto de vehículos compartiendo el canal de radio, se debe usar una ventana de contención grande, y/o disminuir la razón de beacon.
- 6) El análisis de la evaluación de los protocolos IEEE 802.11p/IEEE 1609.4 en escenarios realistas, permitió determinar el impacto de la ventana de contención, conmutación sincrónica de canal y tamaño de beacon, en el desempeño de las aplicaciones de seguridad vial y gestión de tráfico; corroborando así la aplicabilidad de dichos protocolos en entornos VANETs.

## **RECOMENDACIONES**

- 1) Investigar mecanismos de ajuste dinámico del tamaño de la ventana de contención de IEEE 802.11p para mejorar el desempeño de las comunicaciones vehiculares según el contexto.
- 2) Evaluar el impacto de la conmutación sincrónica de canal definida por el estándar IEEE 1609.4 en el desempeño de las redes vehiculares para diferentes intervalos de canal CCH/SCH.
- 3) Comparar el desempeño del protocolo IEEE 802.11p con otros protocolos de la familia IEEE 802.11 aplicables a redes inalámbricas tipo Ad-hoc, con el fin de determinar su conveniencia para entornos vehiculares.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] European Union, “Transport in Figures - Overview of the most recent and most pertinent annual transport related statistics in Europe”, Statistical Pocketbook, 2014.
- [2] F. D. da Cunha, et al., “Data Communication in VANETs: A Survey, Challenges and Applications”, Research Report No. 8498, INRIA Saclay, March 2014.
- [3] Sitio Web PATH, “California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH)”, visitado en Septiembre de 2016, disponible en: <http://www.path.berkeley.edu/>.
- [4] Sitio Web C2C-CC, “Car to Car Communication Consortium (C2C-CC)”, visitado en Septiembre de 2016, disponible en: <https://www.car-2-car.org/>.
- [5] Sitio Web ITS Japonés, “Official web site of the Japan Intelligent Transportation Society”, visitado en Septiembre de 2016, disponible en: <http://www.its-jp.org/>.
- [6] Sitio Web IEEE, “Official web site of the Institute of Electrical and Electronics Engineers”, visitado en Septiembre de 2016, disponible en: <https://www.ieee.org/>.
- [7] Sitio Web ISO, “Official web site of the International Organization for Standardization”, visitado en Septiembre de 2016, disponible en: [www.iso.org/](http://www.iso.org/).
- [8] Federal Communications Commission, “FCC allocates spectrum in 5.9 GHz range for intelligent transportation systems uses”, Report No. ET 99-5, 1999.
- [9] IEEE 802.11p, “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications; Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments”, IEEE Standard 802.11p, 2010.
- [10] IEEE 1609.1, “IEEE Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Resource Manager”, IEEE Standard 1609.1, 2006.
- [11] IEEE 1609.2, “IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments - Security Services for Applications and Management Messages”, IEEE Standard 1609.2, 2013.
- [12] IEEE 1609.3, “IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Networking Services”, IEEE Standard 1609.3, 2016.
- [13] IEEE 1609.4, “IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Multi-Channel Operation”, IEEE Standard 1609.4, 2016.
- [14] IEEE P1609.0/D5, “IEEE Draft Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) – Architecture”, IEEE Standard P1609.0/D5, October 2012.

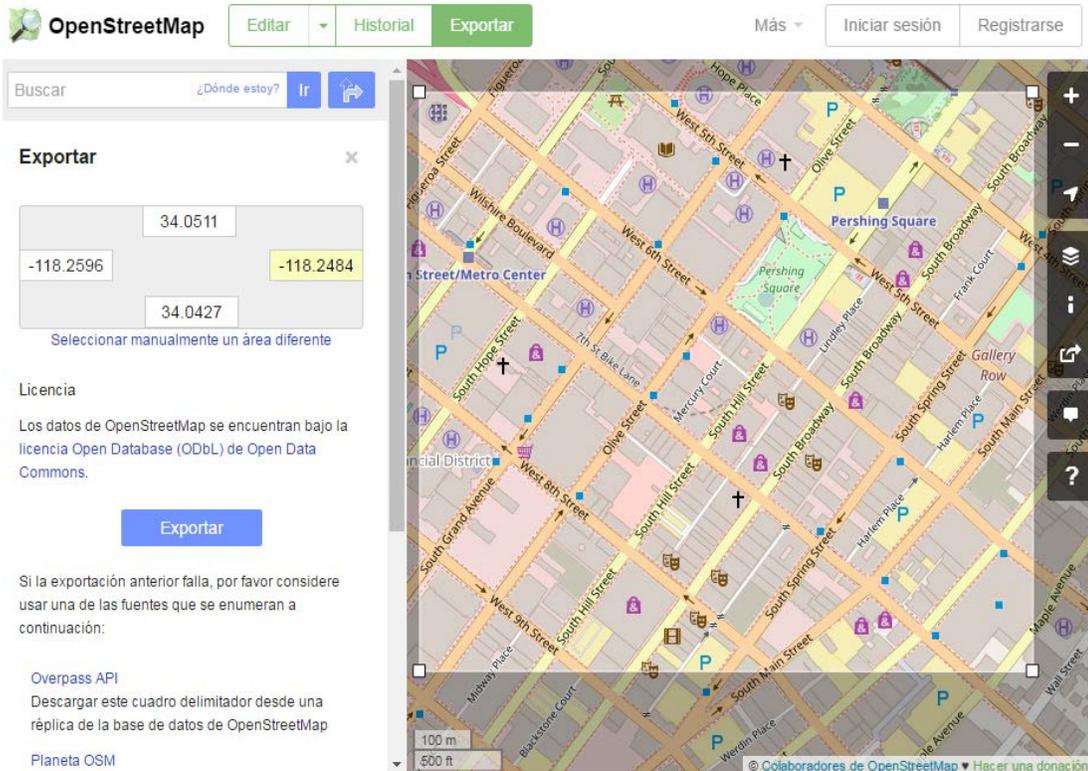
- [15] J. Härrri, F. Filali and C. Bonnet, “Mobility Models for Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey and Taxonomy”, IEEE Communications & Tutorial, vol. 11, no. 4, 2009.
- [16] European Standard, “Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service”, Final Draft ETSI EN 302 637-3 v1.2.1, 2014.
- [17] European Standard, “Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service”, ETSI EN 302 637-2 v1.3.2, 2014.
- [18] R. Reinders, E. M. van Eenennaam, G. Karagiannis, and G. J. Heijenk, “Contention window analysis for beaconing in VANETs,” in Seventh IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing conference, IWCMC 2011, Istanbul, Turkey, July 2011.
- [19] J. Ploeg, et al., “Design and Experimental Evaluation of Cooperative Adaptive Cruise Control”, in Proc. of the 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITS), Washington, DC, USA, 2011.
- [20] Connect & Drive project, Project No. HTASD08002, “Connect & Drive WP-1 requirements document”, Tech. Rep., April 2009.
- [21] G. Karagiannis, et al., “Vehicular Networking: A Survey and Tutorial on Requirements, Architectures, Challenges, Standards and Solutions”, IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2011.
- [22] A. Boukerche, H. Oliveira, E. Nakamura and A. Loureiro, “Vehicular Ad Hoc Networks: A New Challenge for Localization-Based Systems”, Computer Communications, 2008.
- [23] D. Eckhoff, C. Sommer, and F. Dressler, “On the Necessity of Accurate IEEE 802.11p Models for IVC Protocol Simulation,” in 75th IEEE VTC (VTC2012-Spring), Yokohama, Japan, May 2012.
- [24] C. Sommer, Z. Yao, R. German and F. Dressler, “Simulating the Influence of IVC on Road Traffic using Bidirectionally Coupled Simulators”, IEEE Workshops, pp. 1–6, 2008. Disponible en: <http://veins.car2x.org/>.
- [25] D. Eckhoff and C. Sommer, “A Multi-Channel IEEE 1609.4 and 802.11p EDCA Model for the Veins Framework”, in Proc. of 5th ACM/ICST International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems (SIMUTools 2012): 5th ACM/ICST International Workshop on OMNeT++, 2012.
- [26] Q. Yang, et al., “Development of on-board unit (OBU) in vehicular ad-hoc network for highways”, 2014 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE), Vienna, 2014.

- [27] S. I. Sou and O K. Tonguz, “Connectivity through roadside units on highways”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 60, no. 8, pp. 3586-3602, 2011.
- [28] IEEE 802.11, IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange Between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Std. 802.11, 2007.
- [29] D. Acatauassu, I. Couto, P. Alves and K. Dias, “Performance Evaluation of Inter-Vehicle Communications Based on the Proposed IEEE 802.11p Physical and MAC Layers Specifications”, in: The Tenth International Conference on Networks, pp. 170-174, 2011.
- [30] R. K. Schmidt, et al., “Degradation of Transmission Range in VANETs caused by Interference,” Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation, Special Issue on Mobile Ad Hoc Networks, no. 4, 2009.
- [31] Y. L. Morgan, “Notes on DSRC & WAVE Standards Suite: Its Architecture, Design, and Characteristics”, IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2010.
- [32] Sitio Web GPS, “Official web site of the U.S. Government information about the Global Positioning System”, visitado en Septiembre de 2016, disponible en: <http://www.gps.gov/>.
- [33] IEEE 802.2, “IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange between Systems-Local and Metropolitan Area Networks- Specific Requirements — Part 2: Logical Link Control”, IEEE Standard 802.2, 1998.
- [34] IEEE 802, “IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Overview and Architecture”, IEEE Standard 802, 2001.
- [35] J. Postel and J. K. Reynolds, “Standard for the transmission of IP datagrams over IEEE 802 networks”, RFC 1042, 1988.
- [36] Sitio Web The Network Simulator 2, ns-2, visitado en Septiembre de 2016, disponible en: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns.html/>.
- [37] OpenStreetMap, visitado en Julio de 2016, disponible en: <http://www.openstreetmap.org/>.
- [38] U.S. Census Bureau – Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing System, visitado en Octubre de 2016, disponible en: <http://www.census.gov/geo/www/tiger/>.
- [39] M. Treiber and A. Kesting, “Modeling lane-changing decisions with MOBIL”, in: Proceedings of the Traffic and Granularity Flow Conference, Paris, pp. 211–221, June 2007.
- [40] R. Meireles, et al., “Experimental Study on the Impact of Obstructions in Vehicular Ad Hoc Networks”, 2012.
- [41] S. Papanastasiou, J. Mittag, E. Strom and H. Hartenstein, “Bridging the gap between physical layer emulation and network simulation”, in: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Sidney, pp. 1–6, April 2010.

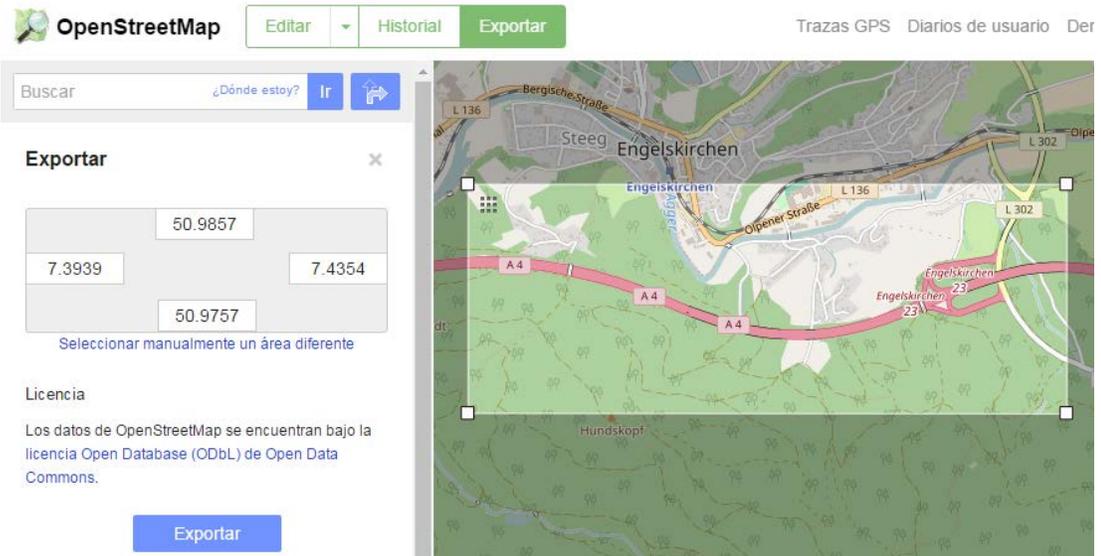
- [42] M. Fiore, "Vehicular Mobility and Network Simulation", to be published in Handbook on Vehicular Networks, S. Olariu and M. C. Weigle Eds., Taylor and Francis, 2008.
- [43] Sitio Web CORSIM: Microscopic Traffic Simulation Model, visitado en Septiembre de 2016, disponible en: <http://www-mctrans.ce.ufl.edu/featured/TSIS/Version5/corsim.htm/>.
- [44] Sitio Web Vissim: The smarter, faster way for model-based system development, visitado en Septiembre de 2016, disponible en: <http://www.vissim.com/>.
- [45] Sitio Web Quadstone Paramics Traffic Simulator, visitado en Julio de 2016, disponible en: <http://www.paramics-online.com/>.
- [46] Sitio Web The TRansportation ANalysis and SIMulation System, visitado en Julio de 2016, disponible en: <https://www.fhwa.dot.gov/planning/tmip/resources/transims/>.
- [47] Sitio Web The Simulation of Urban Mobility, visitado en Septiembre de 2016, disponible en: <http://sumo.sourceforge.net/>.
- [48] F. Karnadi, Z. Mo and K. Lan, "Rapid generation of realistic mobility models for VANET", in Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pp. 2506–2511, 2007.
- [49] Sitio Web The OMNeT++ Simulator, visitado en Septiembre de 2016, disponible en: <http://www.omnetpp.org/>.
- [50] VSC Consortium, "Vehicle Safety Communications Project Task 3- Final Report: Identify Intelligent Vehicle Safety Applications enabled by DSRC", US DOT HS 809 859, March 2005.

# ANEXOS

## ANEXO 1–“Exportando mapas de OpenStreetMap”



The screenshot shows the OpenStreetMap website interface. At the top, there are navigation buttons: "Editar", "Historial", and "Exportar". A search bar is visible with the text "¿Dónde estoy?". The "Exportar" panel is open, displaying a grid of coordinates: 34.0511, -118.2596, -118.2484, and 34.0427. Below the coordinates, there is a button labeled "Exportar". The map itself shows a city street grid with various landmarks and icons. A scale bar at the bottom left indicates 100 meters and 500 feet.



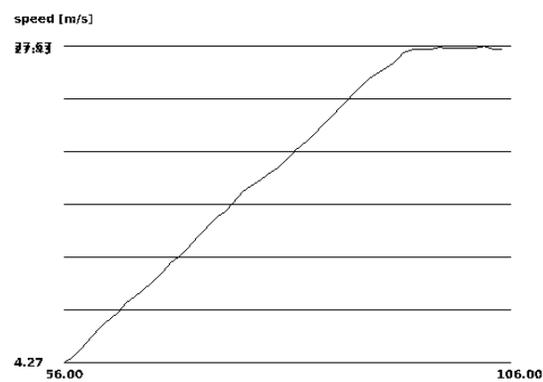
The screenshot shows the OpenStreetMap website interface. At the top, there are navigation buttons: "Editar", "Historial", and "Exportar". A search bar is visible with the text "¿Dónde estoy?". The "Exportar" panel is open, displaying a grid of coordinates: 50.9857, 7.3939, 7.4354, and 50.9757. Below the coordinates, there is a button labeled "Exportar". The map itself shows a rural landscape with a river, fields, and buildings. A scale bar at the bottom left indicates 100 meters and 500 feet.

## ANEXO 2 – “Herramienta de simulación de tráfico SUMO”

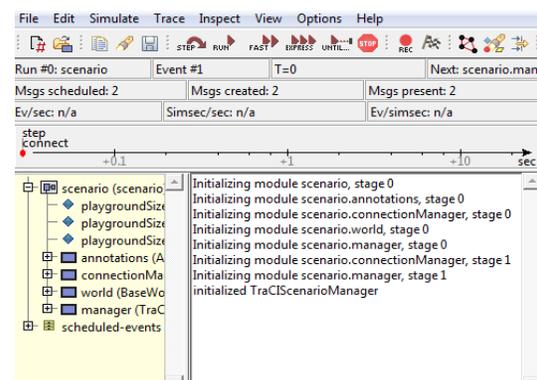
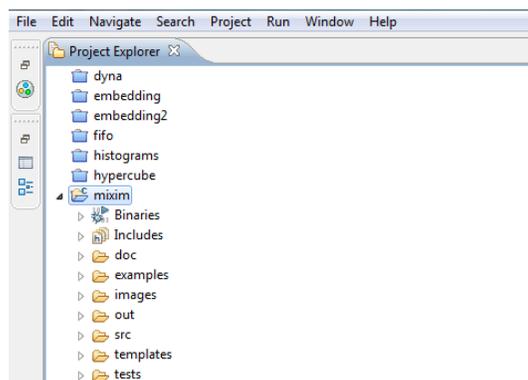
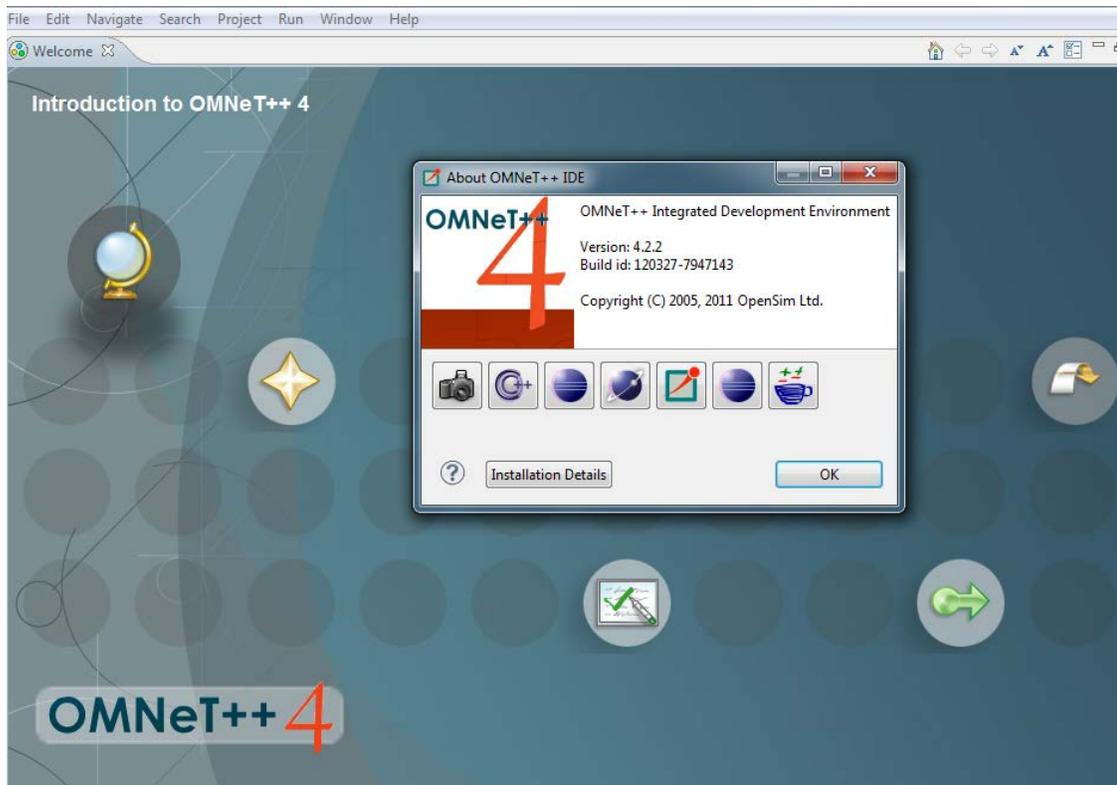


A screenshot of the SUMO software interface. The top menu bar includes File, Edit, Settings, and Wind. Below the menu is a toolbar with various icons. The main window displays a car's status and a table of parameters. The car is shown in a 3D view on the left, and the table is on the right.

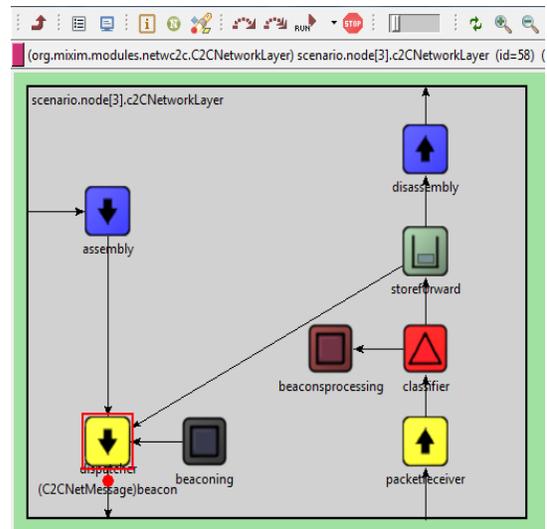
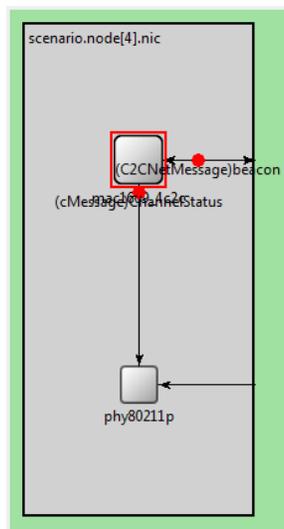
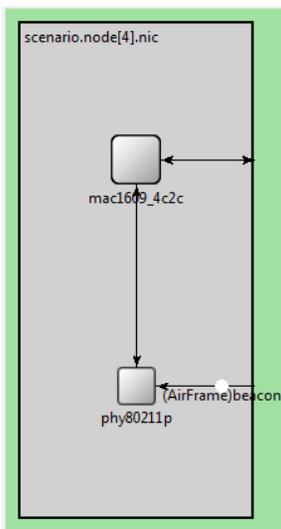
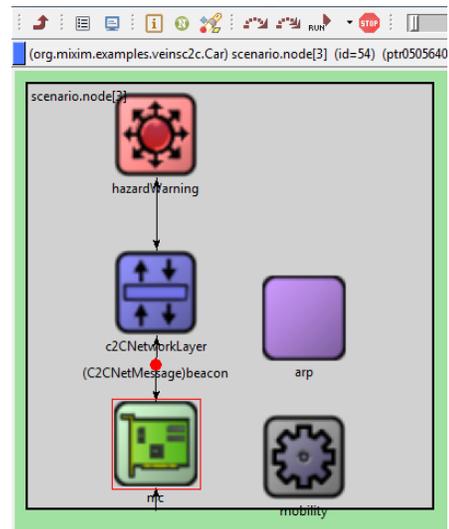
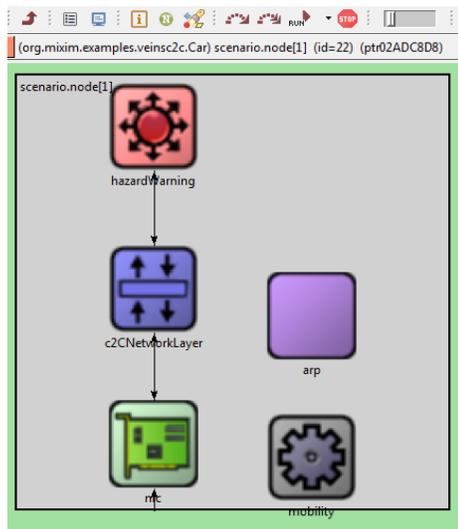
Name	Value	Dynamic
type [NAME]	CarA	✗
waiting time [s]	0.00	✓
last lane change [s]	14.00	✓
desired depart [s]	25.00	✗
position [m]	64.67	✓
speed [m/s]	8.25	✓
angle	51.25	✓
CO2 (HBEFA) [g/s]	2458.86	✓
CO (HBEFA) [g/s]	16.92	✓
HC (HBEFA) [g/s]	0.67	✓
NOx (HBEFA) [g/s]	4.50	✓
PMx (HBEFA) [g/s]	0.19	✓
fuel (HBEFA) [l/s]	0.98	✓
noise (Harmonoise) [dB]	63.39	✓



## ANEXO 3 – “Herramienta de simulación de red OMNeT++”



## ANEXO 4 – “Arquitectura de red de una OBU”



## ANEXO 5 – “Casos de uso y aplicaciones VANETs”

Categoría	Aplicación	Caso de uso [F <sub>Tx</sub> mínima, Latencia crítica, Error de posición crítico]
Seguridad vial	Aviso de peligro en la carretera	*Aviso de frenado de emergencia [10 Hz, 100 ms, - ] *Aviso de condición anómala de función de seguridad [1 Hz, 100 ms, - ] *Aviso de vehículo en sentido contrario [10 Hz, 100 ms, - ] *Aviso de vehículo estacionario [10 Hz, 100 ms, - ] *Aviso de condición de tráfico [1 Hz, - , - ] *Aviso de violación de señal [10 Hz, 100 ms, - ] *Aviso de obras en la vía [2 Hz, 100 ms, - ] *Diseminación de datos asociados a situación excepcional [1-10 Hz, - , - ] *Notificación de lugar peligroso [10 Hz, - , - ] *Aviso de riesgo de colisión (proveniente de RSU) [10 Hz, 100 ms, - ]
	Conocimiento cooperativo	**Aviso de vehículo de emergencia [10 Hz, 100 ms, - ] **Aviso de vehículo lento [2 Hz, 100 ms, - ] **Aviso de motocicleta [2 Hz, 100 ms, - ] **Aviso de vehículo en adelantamiento [10 Hz, 100 ms, - ] **Asistencia en cambio de carril [10 Hz, 100 ms, ≤ 2 m] **Reducción de emisión de luz cooperativa [2 Hz, 100 ms, ≤ 20 m] **Asistencia en incorporación cooperativa [10 Hz, 100 ms, ≤ 2 m] **Aviso de colisión en intersección [10 Hz, 100 ms, - ]
	Mitigación o evasión de colisión cooperativa	**Aviso de peatón en la vía [1 Hz, 100 ms, - ] **Aviso de precolisión [10 Hz, 50 ms, - ] **Aviso de riesgo de colisión en giro de cruce de tráfico [10 Hz, 100 ms, - ] **Aviso de riesgo de colisión en giro de fusión de tráfico [10 Hz, 100 ms, - ] **Aviso de colisión frontal cooperativa [10 Hz, 100 ms, ≤ 1 m]
Gestión de tráfico	Gestión de tráfico cooperativo	Aviso de límite de velocidad contextual/regulatoria [1-10 Hz, - , - ] Aviso de velocidad óptima en semáforos [2 Hz, 100 ms, ≤ 5 m] Información de tráfico e itinerario recomendado [1-10 Hz, 500 ms, - ] Navegación y guía de ruta mejorada [1 Hz, 500 ms, - ] **Gestión de intersección [1 Hz, 500 ms, ≤ 5 m] Cambio de carril flexible cooperativo [1 Hz, 500 ms, - ] Aviso de acceso limitado, notificación de desvío [1-10 Hz, 500 ms, - ] Señalización en el vehículo [1 Hz, 500 ms, - ] Pago electrónico de peaje [1 Hz, 200 ms, - ] **Control de velocidad adaptativo (ACC) [2 Hz, 100 ms, - ] **Formación de platoon (Platooning) [2 Hz, 100 ms, ≤ 2 m]
Valor añadido	Entretenimiento y comodidad	Notificación de punto de interés [1 Hz, 500 ms, - ] Control de acceso automático/acceso a estacionamiento [1 Hz, 500 ms, - ] Comercio electrónico local [1 Hz, 500 ms, - ] Descarga de multimedia [1 Hz, 500 ms, - ] Mensajería instantánea [1 Hz, 500 ms, - ] Sincronización de datos personales [1 Hz, 500 ms, - ] Servicio SOS [1 Hz, 500 ms, - ]
	Gestión de eficiencia ecológica/económica	Renta de vehículo asignación/reporte [1 Hz, 500 ms, - ] Conducción económica/ecológica [1 Hz, 500 ms, - ] Alerta de vehículo robado [1 Hz, 500 ms, - ] Diagnóstico remoto y notificación de reparación en tiempo [1 Hz, 500 ms, - ] Servicios financieros y de aseguramiento [1 Hz, 500 ms, - ] Gestión de grupos de vehículos [1 Hz, 500 ms, - ]
	Gestión del ciclo de vida del vehículo/servicio	Descarga y actualización de mapas [1 Hz, 500 ms, - ] Gestión de relación del vehículo [1 Hz, 500 ms, - ] Recolección de datos del vehículo [1 Hz, 500 ms, - ] Suministro y actualización de software [1 Hz, 500 ms, - ]
	Soporte de gestión de tráfico y eficiencia económica	Gestión de zona de carga [1 Hz, 500 ms, - ] Calibración de datos [1 Hz, 500 ms, - ]