

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica



TRABAJO DE DIPLOMA

Impacto del tamaño de la ventana de contención (CW) del protocolo IEEE 802.11p en el desempeño de las Redes Ad-Hoc Vehiculares

Autor: Lersy Marien Hechavarria Padrón

Tutor: MSc. Sandy Bolufé Aguila

Santa Clara

2016

"Año 58 de la Revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica



TRABAJO DE DIPLOMA

**Impacto del tamaño de la ventana de contención (CW)
del protocolo IEEE 802.11p en el desempeño de las Redes
Ad-Hoc Vehiculares**

Autor: Lersy Marien Hechavarria Padrón

E-mail: lhechavarria@uclv.cu

Tutor: MSc. Sandy Bolufé Aguila

E-mail: sandyb@uclv.edu.cu

Santa Clara

2016

"Año 58 de la Revolución"



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

No existe una manera fácil. No importa cuán talentoso seas, tu talento te va a fallar si no lo desarrollas. Si no estudias. Si no trabajas duro, si no te dedicas a ser mejor cada día.

Will Smith

DEDICATORIA

*A mis padres por velar por mi bienestar y por luchar cada día por mi futuro y mi
preparación profesional.*

*A mi abuelita querida por tener fuerza para luchar por mí a pesar de sus años y por
complacerme en todo, aunque a veces no lo merezca.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios por trazarme el camino para lograr mis metas y por darnos respaldo, protección y salud a mi familia y a mí.

A mi papa por ser motivo de mi realización, por no dejar que me rindiera en esta carrera y sacrificarse todos los días para hacer posible este sueño, por transmitirme su carácter y responsabilidad ante las obligaciones, por el apoyo ilimitado e incondicional que siempre me ha dado, y por tener siempre la fortaleza de salir adelante sin importar los obstáculos.

A mama por creer siempre en mí, por motivarme e incentivar me siempre a tener pensamientos positivos ante las adversidades, por ser un ejemplo de mujer fuerte, por su sabiduría, paciencia y comprensión y por sobre todas las cosas por su infinito amor.

A mi abuela materna por haberme criado y dedicar todos estos años de su vida a luchar por mi bienestar y mi felicidad.

A mi hermanita Lili por reír mis alegrías y llorar mis tristezas como si fueran suyas.

A Yaniel Aguila Valdivia por su compromiso y apoyo desinteresado en la realización de este trabajo, por extenderme su mano y brindarme la fe y la convicción de que a pesar de las dificultades sí podía lograrlo.

A todo el claustro de profesores que contribuyo con mi preparación profesional.

A Sandy Bolufé Aguila por darme la oportunidad de realizar este trabajo bajo su tutoría.

A todas las amistades que durante estos cinco años estuvieron dispuestos a brindarme ayuda cuando lo necesite.

A todos, MUCHAS GRACIAS.

TAREA TÉCNICA

- ❖ Estudio de las características y funcionamiento del protocolo IEEE 802.11p.
- ❖ Estudio de las principales herramientas utilizadas por la comunidad científica para la simulación de comunicaciones vehiculares.
- ❖ Definición de una herramienta de simulación realista que modele escenarios vehiculares IEEE 802.11p.
- ❖ Diseño de experimentos que permitan evaluar el impacto del tamaño de la CW del estándar 802.11p sobre las redes vehiculares.
- ❖ Evaluación del impacto del tamaño de la CW del estándar 802.11p en entornos vehiculares.
- ❖ Elaboración del informe final del Trabajo de Diploma.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

En este trabajo se estudia el impacto del tamaño de la ventana de contención (CW) del protocolo IEEE 802.11p en el desempeño de las redes ad-hoc vehiculares. Para esto, se presentan las principales características de las comunicaciones vehiculares y los temas de esta línea de investigación que constituyen un desafío para la comunidad científica. Se describen los aspectos principales de las arquitecturas de red de los sistemas vehiculares y el funcionamiento del estándar IEEE 802.11p, incluyendo el mecanismo de acceso al medio CSMA/CA. Además, se explica el proceso de implementación del simulador VeINS que integra el simulador de red OMNeT++ y el simulador de tráfico SUMO. Los experimentos se realizan en dos escenarios distintos: entorno urbano y de autopista, definidos por una porción de mapa real de la ciudad de Chicago. El impacto de la ventana de contención se evalúa para distintas densidades de nodos y velocidades promedios de los vehículos, en función de métricas como: número de colisiones promedio, razón de entrega de paquetes y el error de posición real percibido por los vehículos circundantes.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
TAREA TÉCNICA.....	iv
RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Organización del informe.....	3
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN A LAS VANETs	5
1.1 Características y desafíos	5
1.1.1 Características	6
1.1.2 Desafíos	7
1.2 Aplicaciones	8
1.2.1 Seguridad Activa.....	9
1.2.2 Eficiencia vial	9
1.2.3 Servicio público	10
1.2.4 Negocios y entretenimiento	10
1.3 Tecnologías de comunicación de datos	11
1.3.1 Comunicaciones intra-vehiculares	12

1.3.2	Comunicaciones extra-vehiculares	13
1.4	Estándar IEEE 802.11p	15
1.5	Requisitos de Seguridad.....	21
1.5.1	Mecanismos de Seguridad	22
1.6	Conjunto de protocolos para VANETs	23
1.6.1	Arquitectura WAVE	24
1.6.2	Arquitectura C2C-CC	24
1.6.3	Arquitectura CALM.....	25
1.7	Conclusiones del capítulo	27
CAPÍTULO 2. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN Y DISEÑO DE LOS EXPERIMENTOS		28
2.1	Simuladores.....	28
2.1.1	Instalación de MOVE y SUMO.....	34
2.1.2	Instalación de OMNeT ++	35
2.2	Simulación.....	40
2.2.1	Parámetros de simulación	40
2.2.2	Escenarios de simulación.....	42
2.3	Conclusiones del capítulo	45
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS		46
3.1	Métricas de desempeño	46
3.2	Resultados obtenidos en el entorno Urbano Chicago	46
3.2.1	Número de colisiones promedio	46
3.2.2	Razón de entrega de paquetes	48
3.2.3	Error de posición máximo real.....	50
3.3	Resultados obtenidos en el entorno Autopista Chicago	55

3.3.1	Número de colisiones promedio	55
3.3.2	Razón de entrega de paquetes	56
3.3.3	Error de posición máximo real.....	58
3.4	Conclusiones del capítulo	62
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		63
Conclusiones		63
Recomendaciones		64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		65
ANEXOS		68
Anexo I	Conversión del archivo *.osm en extensiones *.net.xml y *.poi.xml.....	68

INTRODUCCIÓN

La seguridad y la movilidad en las carreteras son dos importantes retos a los que la sociedad se enfrenta actualmente, dado el elevado coste humano y económico de los accidentes y las situaciones de congestión, unido al continuo incremento del número de vehículos en circulación.

En los últimos años se ha incrementado notablemente el interés por las redes ad hoc que permiten a los usuarios de dispositivos móviles con tecnología inalámbrica (bluetooth, WiFi) conectarse entre sí sin necesidad de usar la infraestructura de un tercero para intercambiar información entre ellos. En esta rama se encuentran las redes ad-hoc móviles (MANETs, *Movil Ad-Hoc Network*); una tecnología prometedora y emergente que permite el desarrollo de nuevas aplicaciones descentralizadas y está formada por nodos móviles que se conectan entre sí de forma auto-organizada y sin infraestructuras preestablecidas [1].

Cuando los nodos móviles son vehículos, dicha MANET se considera una red ad-hoc vehicular (VANET, *Vehicular Ad-Hoc Network*) [1]. En este caso, los vehículos emplean tecnologías de comunicación de corto alcance para intercambiar información dinámica que pueda resultarle de utilidad, cumpliendo así con los requisitos de conocimiento cooperativo. Esto se realiza a través de la difusión periódica de mensajes de un salto (*single-hop broadcast*) llamados *beacons*, que incluyen datos como la posición, velocidad y aceleración del vehículo. Como resultado, cada vehículo tiene conocimiento del estado de los otros vehículos que están dentro de su rango de transmisión. La idea es que un vehículo conociendo el entorno vehicular puede mitigar situaciones potencialmente peligrosas. De allí que las aplicaciones enfocadas a la seguridad vial constituyan las más importantes y críticas en el ámbito de estas redes.

IEEE 802.11p [2] es el estándar de facto definido para la capa MAC y PHY de los sistemas vehiculares. Este protocolo representa una alternativa a los estándares WiFi 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. La capa MAC de IEEE 802.11p usa Acceso Múltiple por Detección de Portadora con evasión de colisiones (CSMA/CA, *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) para proveer acceso justo al canal de comunicaciones y reducir las colisiones. Con CSMA/CA, cuando un nodo intenta acceder al medio y encuentra el canal ocupado, escoge un tiempo de contención aleatorio de un intervalo $[0, CW]$, y espera este tiempo para intentar acceder al medio (CW representa el tamaño de la ventana de contención). En escenarios con baja densidad de nodos, la probabilidad de que dos nodos intenten acceder al medio al mismo tiempo es baja, sin embargo, en escenarios con alta densidad de nodos, la probabilidad de que dos nodos escojan el mismo tiempo de contención se incrementa, lo que eleva la probabilidad de colisión. Incrementar el tamaño de la ventana de contención (CW, *Contention Windows*) puede reducir el número de colisiones, pero a expensas de un aumento en la demora de comunicación, lo cual atenta contra el correcto funcionamiento de las aplicaciones de seguridad vial [3]. A partir de esta situación se ha planteado como objetivo general: Evaluar el impacto del tamaño de la CW del protocolo IEEE 802.11p en el desempeño de las redes VANETs. Para dar cumplimiento al objetivo general del trabajo se trazaron los siguientes objetivos específicos:

1. Caracterizar el protocolo IEEE 802.11p definido para la capa MAC y PHY de los futuros sistemas de transporte inteligentes (ITS).
2. Definir una herramienta de simulación que permita modelar escenarios vehiculares IEEE 802.11p.
3. Diseñar experimentos que evalúen el impacto del tamaño de la ventana de contención (CW) del protocolo IEEE 802.11p en el desempeño de Redes Ad-Hoc Vehiculares.

Se plantean por tanto las siguientes interrogantes de investigación:

1. ¿Cuáles son las principales características del protocolo IEEE 802.11p definido para la capa MAC y PHY de los futuros sistemas de transporte inteligentes (ITS)?

2. ¿Qué herramienta de simulación usar para modelar escenarios vehiculares IEEE 802.11p?
3. ¿Cuáles experimentos permiten evaluar el impacto que presenta el tamaño de la ventana de contención (CW) del protocolo IEEE 802.11p sobre el desempeño de las Redes Ad-Hoc Vehiculares?

1.1 Organización del informe

El trabajo se estructura en introducción, capitulario, conclusiones y recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

INTRODUCCIÓN:

Se realiza una breve descripción sobre la importancia y necesidad del tema en cuestión y se mencionan los elementos del diseño teórico.

CAPÍTULO I:

Revisión bibliográfica sobre redes ad-hoc vehiculares y características del protocolo IEEE 802.11p.

CAPÍTULO II:

Implementación de las herramientas de trabajo y diseño de experimentos que evalúen la influencia del tamaño de la ventana de contención (CW) de IEEE 802.11p sobre las comunicaciones vehiculares.

CAPÍTULO III:

Interpretación y análisis de los resultados que arrojan las simulaciones.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

Se describen los resultados obtenidos a partir de los objetivos trazados inicialmente en la investigación y se abordan aspectos que puedan enriquecer y perfeccionar estudios realizados en futuras investigaciones.

BIBLIOGRAFÍA:

Listado de la bibliografía.

ANEXOS:

Proceso de conversión de mapas reales a mapas de red.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN A LAS VANETs

1.1 Características y desafíos

Las VANETs utilizan el medio inalámbrico para comunicarse. Están integradas por un conjunto de vehículos que se organizan para comunicarse entre ellos sin tener ningún tipo de infraestructura previa desplegada, ya se trate de un punto de acceso WLAN o de una antena de telefonía, en la que los mismos constituyen nodos móviles [4].

En una VANET se distinguen dos tipos de entidades: vehículos e infraestructuras de comunicaciones. Cada vehículo se define como un nodo de la red y está equipado con una unidad de comunicación a bordo (OBU, *On Board Unit*), mientras que la infraestructura de comunicaciones está formada por puntos de acceso estacionarios ubicados en las vías de circulación, denominados unidades al lado del camino (RSU, *Road Side Units*). La función de la OBU es hacer posible la comunicación, intercambiando información con otros vehículos o con la RSU; esta última se encarga de gestionar conexiones entre los nodos para establecer comunicaciones bidireccionales entre ellos y actúa como pasarela o *gateway* para proveer acceso a internet en los vehículos.

Por otro lado, el monitoreo de datos sobre la red y las condiciones del entorno es llevado a cabo por sensores, éstos dispositivos conforman una red denominada red de sensores vehiculares (VSN, *Vehicular Sensor Network*) que registra información en tiempo real, relacionada con el tráfico y algunas situaciones ambientales (Ej.: polución, temperatura, vibración, presión, movimiento, etc.), posteriormente las aplicaciones vehiculares procesan los datos y generan los mensajes que serán difundidos por la VANET [5].

1.1.1 Características

Se han definido dos tipos de comunicación en las redes vehiculares: La comunicación inter-vehicular o vehículo-a-vehículo (V2V), donde los automóviles intercambian mensajes directamente, y la comunicación vehículo-a-infraestructura (V2I) donde el intercambio se realiza con dispositivos fijos, como peajes y puntos de acceso a Internet. En conjunto, las comunicaciones V2V y V2I se conocen como V2X. Sus principales características se describen a continuación [6]–[9]:

- ❖ Autonomía: Cada nodo tiene capacidad de procesamiento de la información que se intercambia en la red. El control de la red no depende de una infraestructura externa, sino que se distribuye en todos los nodos de la red siendo así más tolerante a fallos.
- ❖ Encaminamiento distribuido: es necesario que cada nodo por separado, y todos en conjunto, provean un mecanismo dinámico de enrutamiento. Los protocolos clásicos de enrutamiento no son aplicables a este tipo de redes ya que no están preparados para las variaciones de topología que presentan.
- ❖ Alta capacidad computacional: Las OBU en los nodos deben manejar, dependiendo de la aplicación, elevados flujos de tráfico de red con baja prioridad (en un *streaming* de video) o bajas tasas de datos con alta prioridad (aplicaciones de seguridad). Además, controlan el enrutamiento y la conexión con las RSU, por lo que los dispositivos requieren capacidad computacional para realizar dichas tareas simultáneamente y sin latencias muy elevadas (en especial en aplicaciones críticas).
- ❖ Rápido cambio en la topología: Debido a la alta velocidad de los nodos ocurren frecuentes cambios en la topología de la red, que introduce alta sobrecarga de comunicación para el intercambio de la información de la topología.
- ❖ Capacidad variable de los enlaces: Esta característica tiene cabida en todas las comunicaciones inalámbricas, pues es intrínseca al medio de transmisión, pero sus efectos se agravan más en las MANETs. Esto se debe a que cada nodo actúa como *router* y la información atraviesa múltiples enlaces inalámbricos.
- ❖ Consumo reducido de energía: el propio nodo puede proporcionar energía permanente a los dispositivos informáticos y de comunicación.

- ❖ **Alta movilidad:** Operan sobre un entorno altamente dinámico. Los vehículos en las carreteras viajan a velocidades muy altas, lo cual conlleva a predecir que el período de comunicación inter- vehicular pueda ser muy corto.
- ❖ **Escala Potencialmente Grande:** Se extienden sobre toda la red vial, aumentando de tal forma el tamaño de la red, esto implica la participación de un elevado número de nodos, que requieren niveles de potencia elevados para ampliar su rango de cobertura y mantener las comunicaciones.

1.1.2 Desafíos

Las características de las redes VANETs y más generalmente de las MANETs abren un nuevo campo de investigación para la comunidad científica ya que no se han resuelto muchos de los problemas que plantean ese tipo de redes [4], [6], [10], [11]. Veamos a continuación una serie de temas que quedan abiertos a la investigación:

- ❖ **Movilidad:** La idea básica de redes ad hoc es que cada nodo en la red es móvil y puede desplazarse de un lugar a otro dentro del área de cobertura, pero aun así la movilidad es limitada, los vehículos hacen conexión enlazando su camino con otros vehículos que pudiera no haber coincidido anteriormente, y esta conexión tiene una duración de sólo unos segundos, ya que cada vehículo se dirige a su dirección, y estos dos vehículos pudieran no encontrarse de nuevo. Así que asegurar este desafío de movilidad es un problema difícil. Muchas investigaciones han abordado este reto, pero aun así este problema continúa sin resolverse.
- ❖ **Ancho de banda limitado:** El ancho de banda que disponemos en una infraestructura inalámbrica es inferior al de una cableada, además, es infrautilizada debido a la atenuación e interferencias de señales electromagnéticas. Sin embargo, los usuarios querrán disponer de las mismas aplicaciones disponibles que en un medio cableado.
- ❖ **Calidad de servicio (QoS, *Quality of Service*):** La calidad de servicio en redes cableadas se proporciona mediante mecanismos de reserva de recursos. Sin embargo, la reserva de recursos se complica con la variabilidad de la topología. Además, ninguna red puede prescindir de QoS ya que las aplicaciones de tiempo real como la videoconferencia o el videostreaming exigen un nivel alto de esta.

- ❖ Seguridad: Debido a que las VANETs utilizan el aire como canal de comunicación y no cuentan con una infraestructura que pueda centralizar los servicios de seguridad (ej.: la autenticación de usuarios o el cifrado de los paquetes), presentan más riesgos ante los ataques externos. Algunos de los desafíos de seguridad que se presentan son los siguientes:
 - Restricción de tiempo real: estas redes están en un tiempo crítico donde el mensaje relacionado con la seguridad debe ser entregado con 100 ms de retardo de transmisión. Así que, para conseguir la limitación en tiempo real, se debe utilizar un rápido algoritmo criptográfico. El mensaje y la autenticación de identidad deben hacerse en tiempo.
 - Baja tolerancia para el error: utilizan información crítica de vida en la que se realizan la acción en tiempo muy corto. Un pequeño error en el algoritmo probabilístico puede causar grandes daños materiales.
 - Distribución de claves: Todos los mecanismos de seguridad implementados están basados en claves. Cada mensaje es encriptado y requiere que se descifre en el extremo receptor, ya sea con la misma clave o diferentes. También diferentes fabricantes pueden instalar claves de diferentes maneras y la confianza en la infraestructura de clave pública se ha convertido en el principal problema. Por lo tanto, la distribución de claves entre los vehículos es un reto importante en el diseño de los protocolos de seguridad.

1.2 Aplicaciones

Uno de los principales objetivos de los Sistemas Inteligentes de Transportes (ITS, *Intelligent Transport Systems*) es sin lugar a dudas, poder brindar un mejor escenario de conocimiento de las carreteras a los conductores, para de cierta forma poder reducir el número de accidentes y a su vez la conducción se pueda realizar de una manera más cómoda y fluida.

Para las redes que permiten la comunicación de vehículo a vehículo como las VANETs, las aplicaciones pueden ir desde un simple intercambio de información entre sus nodos, hasta el poder tener acceso a contenidos Multimedia e internet, los beneficios de estas Redes vehiculares se pueden ver más en detalle en las siguientes aplicaciones.

1.2.1 Seguridad Activa

La seguridad activa está catalogada como el servicio más demandado por las redes VANETs, el objetivo de esta categoría es suministrar recursos a los conductores para que estos realicen una conducción segura, obteniendo información de situaciones peligrosas, para que el vehículo esté preparado para evitar accidentes o para reaccionar apropiadamente si un accidente no puede evitarse [8].

Las aplicaciones de seguridad se pueden agrupar en tres sub-categorías [5]:

- ❖ **Evasión de colisiones (*Collision Avoidance*):** La RSU detecta el riesgo de una colisión entre dos vehículos y advierte a los conductores mediante la OBU. Como ejemplo de estas advertencias están:
 - Alarma de ubicación peligrosa.
 - Advertencia anti colisión.
 - Advertencia de cambio de línea.
- ❖ **Notificación de señales de tránsito (RSN, *Road Sign Notifications*):** Su función es advertir a los conductores sobre la señalización vial y brindar asistencia durante el recorrido. Algunas aplicaciones RSN son:
 - Advertencia de velocidad en curva.
 - Advertencia de violación de señal de tránsito.
- ❖ **Gestión de incidentes (*Incident Management*):** Empleadas en situaciones de emergencias ante un accidente de tránsito. Aquí se destacan:
 - Alarma de vehículo de emergencia
 - Advertencia post-colisión/choque

1.2.2 Eficiencia vial

El propósito de estas aplicaciones es mejorar las condiciones del tráfico, mediante la gestión y el monitoreo del tránsito de vehículos y las condiciones de las vías de circulación. De acuerdo a su función, las aplicaciones de eficiencia se dividen en dos subcategorías [5]:

- ❖ **Gestión del tráfico:** Procesan información sobre el flujo vehicular y controlan desde las RSU elementos del sistema de transporte como las luces de los semáforos y el cobro de peajes. Entre este tipo de aplicaciones se encuentran:

- Control de velocidad.
 - Control eficiente del tráfico.
 - Peajes libres de tráfico.
 - Guía de ruta y navegación mejorada.
- ❖ Monitoreo del tráfico: Monitorean los vehículos y las condiciones de las carreteras, en caso de irregularidades notifican a los conductores y a las autoridades de tránsito. Algunos ejemplos de estas categorías son:
- Monitor de condiciones viales.
 - Agente de seguimiento y localización vehicular.

1.2.3 Servicio público

Estas aplicaciones buscan mejorar la atención que existe hoy en día de las unidades de emergencia y unidades de respuesta rápida como son las ambulancias, bomberos, entre otras, ante una inminente catástrofe natural y por cualquier otro motivo que se requiera de una atención rápida de sus unidades vehiculares.

Un servicio de esta categoría que será implantado a nivel europeo será la llamada de urgencia (*ecall*) un dispositivo instalado en un vehículo que, o bien cuando se produce un grave accidente, o de manera manual por los utilitarios del vehículo, transmite una llamada de urgencia al punto de respuesta del servicio público (PSAP, *Public Safety Answering Point*) más cercano, y, al mismo tiempo, envía determinados datos sobre el vehículo, en particular, su localización precisa [8].

1.2.4 Negocios y entretenimiento

La aplicación se centra en la prestación de servicios a los usuarios, procesamiento de datos de tareas del vehículo o solicitudes de pago, así como en la descarga de música, servicios de flota para empresas dedicadas al transporte, un simple mantenimiento de vehículo, o realizaciones de pago por estacionamientos o por el peaje de las carreteras. La mayoría de estas aplicaciones se centran en el aumento del disfrute y del confort para los utilitarios del auto [8]. Estos son algunos ejemplos:

- ❖ Cálculo óptimo de rutas con datos de tráfico en tiempo real. Podrá ofrecerse como un servicio Web que permanentemente informa del estado de las carreteras en tiempo real.

- ❖ Tele diagnóstico y ayuda *on-line* en caso de avería: gracias a esta aplicación se podrán desplegar funcionalidades como [6]:
 - Consulta del manual electrónico y multimedia por parte del conductor desde su propio equipo.
 - Consulta del manual por parte de las empresas de asistencia en carretera.
 - Consulta a un sistema experto automático de datos en caso de avería.
 - Envío automático de datos en caso de avería.
 - Tele diagnóstico: Esta utilidad permite de forma remota valorar el grado de avería y en su caso facilitar la solución al conductor.
- ❖ Acceso a Internet desde los vehículos: Los usuarios podrán acceder a toda la red e informarse de las condiciones meteorológicas del destino, reservar un hotel e incluso descargar y reproducir contenidos multimedia [6].
- ❖ Búsqueda y reserva de plazas de aparcamiento: El parking informa la localización de las plazas libres, de forma que los usuarios desde el propio vehículo y en ruta pueda comunicarse con el parking destino, notificarle la hora aproximada de llegada y reservar una de las plazas.
- ❖ Información y alertas de gasolineras: A través de este servicio, los usuarios podrán interrogar al sistema de las distancias a las gasolineras más próximas, la empresa y las tarifas de los distintos carburantes [6].
- ❖ Envío de publicidad: Servicio mediante el cual los equipos de la infraestructura envíen publicidad a los vehículos, relacionada principalmente con los servicios de la vía.

1.3 Tecnologías de comunicación de datos

Una vez definidos los diferentes servicios que necesitan hacer uso de las comunicaciones inalámbricas para transmisión de información en el ámbito del transporte es necesario definir cuáles son las tecnologías disponibles en la actualidad para llevar a cabo cada una de las aplicaciones.

En un entorno vehicular las tecnologías inalámbricas pueden agruparse, atendiendo al área de cobertura que alcanzan, en comunicaciones intra-vehiculares, dígame todas aquellas que permiten el intercambio de información entre los diferentes sistemas dentro del vehículo y

comunicaciones extra-vehiculares encargadas de intercambiar la información entre el vehículo y su entorno, ya sean otros vehículos o la infraestructura [12].

1.3.1 Comunicaciones intra-vehiculares

Las comunicaciones intra-vehiculares que están basados en redes inalámbricas, están dedicadas única y exclusivamente a dar servicio a sistemas de confort y multimedia, no siendo utilizados nunca para temas relacionados con seguridad, debido a su menor fiabilidad en lo referente a tiempo real e interferencias. Las tecnologías para comunicaciones inalámbricas que pueden ser utilizadas en aplicaciones intra-vehiculares disponibles en la actualidad son tres: Bluetooth, Zigbee y UWB.

❖ Bluetooth

También conocido como 802.15.1 es una especificación industrial para las denominadas Redes Inalámbricas de Área Personal (WPANs, *Wireless Personal Area Networks*) que posibilita la transmisión de datos entre diferentes dispositivos mediante un enlace por radiofrecuencia en la banda de 2.4 GHz. Diseñado para permitir el desarrollo de dispositivos de comunicaciones de bajo coste, con bajo consumo y de corto alcance (1 metro, 10 metros, 100 metros) con velocidades de transmisión de 1 Mbps en el modo de transferencia básica y una velocidad de transmisión aérea total de 2 a 3 Mbps en el modo de transferencia de datos mejorada.

❖ ZigBee

Es la tecnología más utilizada en redes de sensores ad-hoc. Se basa en el nivel físico y el control de acceso al medio (MAC) del estándar 802.15.4. Presenta anchos de banda muy pequeños y cobertura reducidas (250 Kbps hasta 75m). Es de gran utilidad para enviar poca información en pequeñas distancias y tiene menor consumo eléctrico que *Bluetooth*. Zigbee posee además la característica de permitir comunicaciones en tiempo real. Para ello tiene la posibilidad para definir la prioridad en todos los mensajes que son emitidos por los nodos. Esto se alcanza por medio de un mecanismo que garantiza el intervalo de tiempo de transmisión para cada nodo, de modo que los mensajes prioritarios puedan ser enviados tan rápidamente como sea posible.

❖ UWB

UWB es una tecnología de RF capaz de ofrecer transmisión de datos de alta velocidad (hasta 400 ó 500 Mbit/s) y baja potencia en alcances de unos pocos metros (10 m aproximadamente). Puede utilizarse para transmitir voz, vídeo u otro tipo de datos digitales. Su principal ventaja respecto a otras tecnologías inalámbricas radica en el hecho de que puede transmitir más datos utilizando menos potencia que el resto de sistemas disponibles.

1.3.2 Comunicaciones extra-vehiculares

Hasta este momento, hemos descrito las diferentes tecnologías disponibles en la actualidad para el intercambio de información dentro de los vehículos. Sin embargo, existe otro tipo de entorno de comunicaciones, mucho más amplio que los anteriores, que dan soporte a un conjunto de aplicaciones claramente diferenciado; son las denominadas comunicaciones extra-vehiculares.

❖ Redes de Área Local Inalámbricas (WLAN)

El popular WiFi (*Wireless Fidelity*) define la norma que garantiza la interoperabilidad de las denominadas redes de área local inalámbricas (WLAN, *Wireless Local Area Network*). Utiliza tecnología de radiofrecuencia que permite mayor movilidad a los usuarios al minimizar las conexiones cableadas. Las WLAN van adquiriendo importancia en muchos campos, como en los hogares para compartir el acceso a Internet entre varias computadoras y, por supuesto, en el ámbito del transporte, donde es hoy en día, el único sistema con total disponibilidad para comunicaciones embarcadas de libre disposición.

❖ Estándar IEEE 802.11

Se trata de un conjunto de normas [13] que implementan los niveles inferiores del modelo de Sistema de Interconexión Abierto (OSI, *Open System Interconnection*), en concreto, el nivel físico y el de enlace, sobre un canal inalámbrico.

Este estándar define el protocolo y la compatibilidad de interconexión de los equipos de comunicación de datos vía aérea, bien sea por radio a 2.4 GHz o por infrarrojos, en forma de red de área local (LAN, *Local Area Networks*), utilizando para compartir el medio el protocolo acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones (CSMA/CA, *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) [12].

La capa MAC de 802.11 proporciona dos métodos distintos de ganar acceso al medio; por contienda, conocido como Función de Coordinación Distribuida (DCF, *Distributed Coordination Function*) y libre de contienda, conocido como Función de Coordinación de Punto (PCF, *Point Coordination Function*).

PCF sólo puede ser usado cuando la red contiene un punto de acceso que mantiene un controlador de acceso. En este modo, todos los dispositivos deben recibir permiso de este controlador de acceso para empezar a transmitir. El procedimiento empieza cuando el dispositivo móvil envía una solicitud al punto de acceso indicando que desea transmitir. Este modo es opcional en el estándar, mientras que DCF es obligatorio, pudiendo el punto de acceso alternar entre ambos.

DCF se basa en la técnica CSMA/CA y todos los terminales deben competir por el acceso al canal. Cuando un dispositivo desea transmitir un paquete, empieza a escuchar el canal. Si el canal está libre durante un tiempo conocido como espacio distribuido entre tramas (DIFS, *Distributed Interframe Spacing*) empezará a transmitir.

La mayoría de productos son de la especificación "b" o "g", con 54Mbps, sin embargo, ya se ha ratificado el estándar 802.11n que sube el límite teórico hasta los 160 Mbps.

❖ WiMAX

Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (WiMAX, *World wide Interoperability for Microwave Access*) es un estándar de transmisión inalámbrica de datos (802.16 MAN) que utiliza las ondas de radio en las frecuencias de 2,5 a 5,8 GHz, y proporciona accesos concurrentes en áreas de hasta 48 km de radio y velocidades de 70 Mbps, utilizando tecnología que no requiere visión directa con las estaciones base. WiMAX es un concepto parecido a WiFi, pero con mayor cobertura y ancho de banda.

La idea fundamental de WiMAX se centra en poder dar una gran variedad de servicios, motivado por el bajo coste de los enlaces, que pueden ir desde actuar como *backbone* para redes IEEE 802.11, dar servicios de conexión a dispositivos móviles sin hacer uso del estándar IEEE 802.11, como red de respaldo de las redes cableadas. Entre sus principales características se destaca la facilidad para añadir más canales, dependiendo de la regulación de cada país y anchos de banda configurables y no cerrados, sujetos a la relación de espectro.

Tabla 1.1. Características de las tecnologías inalámbricas empleadas en VANETs [6]

Tecnología	Cobertura	Tasas	Consumo
Bluetooth (802.15.1)	20 m	2 Mbps	Medio
Zigbee (802.15.4)	75 m	250 Kbps	Muy Bajo
UWB (802.15.3)	< 10 m	480 Mbps	Bajo
802.11b	140 m	11 Mbps	Alto
802.11g	140 m	54 Mbps	Alto
802.11n	250 m	160 Mbps	Alto
WiMAX (802.16e)	50 Km	75 Mbps	Alto

1.4 Estándar IEEE 802.11p

IEEE 802.11p define las características de la capa PHY y MAC necesarias para operar en un ambiente vehicular [5] y permitir las comunicaciones en el espectro de los 5.9 GHz.

La capa física es una variación del estándar IEEE 802.11a, utiliza la Multiplexación por División en Frecuencias Ortogonales (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) pero con tasas de transmisión de 3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24, y 27 Mbps 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. Utiliza 52 sub-portadoras moduladas con BPSK, QPSK, 16-QAM o 64-QAM, así como codificaciones con tasas de 1/2, 2/3, o 3/4 [13].

Espectro DSRC

Comunicación de Corto Rango Dedicado (DSRC, *Dedicated Short Range Communications*) [14] está basado en la especificación IEEE 802.11p WAVE [13] y se entiende como un complemento a los sistemas de comunicaciones basados en telefonía móvil, proporcionando tasas de transferencia de datos muy altas en circunstancias donde es importante minimizar los tiempos de latencia en el establecimiento de los canales y el aislamiento de zonas de comunicaciones relativamente pequeñas.

Esta tecnología tiene una estructura mixta entre el Internet inalámbrico y los sistemas radio módem. Son capaces de difundir información en modo *broadcast* o a un usuario determinado, según las necesidades y la naturaleza de la información, integrando todos los vehículos que se encuentran cercanos en una zona reducida de terreno en una misma red,

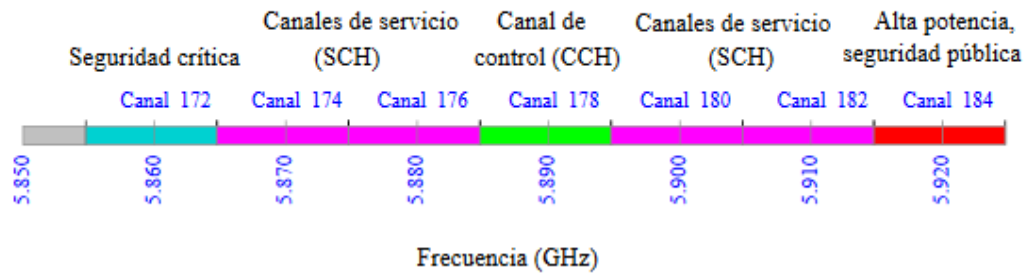
que permite el intercambio de información de forma rápida y fiable, con un tiempo mínimo de conexión a la red y sin demoras en el acceso a la información [12].

El nivel físico propuesto por el DSRC se estructura en supertramas de duración predeterminada de 100 ms, compuestas por siete canales de 10 MHz de ancho de banda. Cada intervalo asociado a una supertrama se divide asimismo en dos períodos cada uno de los cuales se dedica a un aspecto particular de la comunicación. El primero de ellos es el Canal de Control (CCH, *Channel Control*), con una duración por defecto de 50 ms. Su aplicación se restringe a la transmisión en modo *broadcast* de mensajes de seguridad vial. El segundo intervalo es el Canal de Servicio (SCH, *Service Channel*), compuesto por la multiplicación temporal cada 100 ms de canales que operan a distintas frecuencias dentro de la banda de los Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS, *Intelligent Transportation Systems*). SCH permite la transmisión de información relacionada con seguridad, o no seguridad a través de paquetes IP (protocolo de Internet).

El CCH es el número 178 de la banda del espectro y se usa como canal de referencia para realizar una primera detección de los vehículos cercanos para el establecimiento de las comunicaciones. Al mismo tiempo, dicho canal permite anunciar los servicios disponibles en los canales SCH (acceso a Internet, descarga de contenidos, etc.). Los dos canales del extremo de la banda del espectro son reservados para usos especiales, el resto de los canales son SCH.

Cada dispositivo puede alternar entre el canal de control y uno de los canales de servicio, pero diferentes canales no pueden usarse en el mismo instante de tiempo. Para una mejor comprensión obsérvese el diagrama según la Figura 1.1 [15].

A partir de las diferencias expuestas resalta una que es fundamental entre CCH y SCH, la cual radica en que el primero no usa IP para la transmisión de paquetes. Por lo cual recurre a un protocolo de propósito específico que opera al mismo nivel que IP y que se representa con el acrónimo Protocolo de mensajes cortos WAVE (WSMP, *WAVE Short Message Protocol*) [15]. WSMP permite una mensajería que toma en consideración las particularidades especiales que define a los entornos de tránsito vehicular y disminuye sustancialmente la carga de los paquetes (reduciendo las cabeceras) para mejorar el flujo en las transmisiones [14].



a)

178	174	176	178	180	182	184	Número del Canal
Canales de Servicio	Canal de Servicio	Canal de Servicio	Canal de Control	Canal de Servicio	Canal de Servicio	Canal de Servicio	Tipo de Canal
33 dBm	33 dBm	33 dBm	44.8 dBm	23 dBm	23 dBm	40 dBm	Potencia de Transmisión (Máx.)
5.860	5.870	5.880	5.890	5.900	5.910	5.920	Frecuencia de Transmisión GHz

b)

Figura 1.1. Espectro asignado a DSRC: a) Distribución de los canales en el espectro de frecuencias. b) Especificaciones de cada canal.

Funcionamiento de la red 802.11p

Después de que un OBU se ha unido a una red 802.11p, el OBU debe censar el canal CCH para recolectar información de red necesaria. Dentro del modo WAVE, las transmisiones de paquetes de datos solamente se envían dentro de un Conjunto de Servicios Básicos de Modo WAVE (WBSS, *Wave Mode Basic Service Set*). El nodo que inicia un WBSS se le denomina proveedor WBSS y los nodos que se unen a un WBSS se les denominan usuarios WBSS [5].

Los proveedores WBSS deben difundir periódicamente en *broadcast* una trama de anuncio de servicio WBSS (WSA, *WBSS Service Announcement*) para dicho WBS sobre el CCH. El

OBU debe de monitorear todos los WSA sobre el CCH para conocer la información de todos los WBSS disponibles [5].

Para priorizar el acceso en IEEE 802.11p se utiliza el acceso al canal distribuido mejorado (EDCA, *Enhanced Distributed Channel Access*) basado en CSMA/CA [6]. Este se deriva de la Función de Coordinación Distribuida especificada para el estándar original 802.11, pero integra la diferenciación de servicios mediante la definición de cuatro interfaces virtuales de acceso que implementan funcionalidades de *backoff* para la transmisión de las tramas [14].

Cada interfaz se configura con una serie de parámetros relativos al tamaño máximo de Ventana de Contención (CW, *Contention Windows*) así como intervalos de espaciado entre tramas (AIFS, *Arbitrary Inter-Framespace*) que vendrán determinados por la clase de acceso que dicha interfaz tenga asignada. Esto permite establecer distintas calidades de servicio (QoS, *Quality of Service*) para los numerosos tipos de aplicaciones que se prevé servir. La Tabla 1.2 [16] muestra los valores de los parámetros utilizados por IEEE 802.11p para diferentes tipos de tráfico de la aplicación. Las Categorías de Acceso (ACs, *Access Categories*) asignadas son las siguientes: *back ground* (AC_BK), *best effort* (AC_BE), *voice* (AC_VO), *video* (AC_VI).

Tabla 1.2. Parámetros para las diferentes categorías de aplicación en IEEE802.11p

AC	CW _{mín}	CW _{máx}	AIFSN
VO	3	7	2
VI	7	15	3
BE	15	1023	6
BK	15	1023	9

De la Tabla 1.2 se puede ver claramente que la voz y el tráfico de video se pueden configurar con mayor prioridad y por tanto mayor rendimiento, escogiendo el espacio de tiempo entre tramas más corto y el tamaño de CW más pequeño. Sin embargo, ante una alta densidad de nodos la disminución del rendimiento es inminente ya que hay mayores probabilidades de colisión.

EDCA se basa en el servicio de paquetes de datos según la prioridad asignada a la aplicación que los genera. Cada estación mantiene configuraciones independientes para cada una de las cuatro categorías definidas anteriormente. Cada categoría opera con mecanismos de acceso según escucha de portadora, es decir, cada estación virtual monitoriza el medio durante un intervalo determinado de tiempo (AIFS) a partir del cual ejecutará un proceso decremental en el que escoge un número de *slots* aleatorios a partir del intervalo $[0, CW+1]$ [14].

En la primera transmisión el valor de CW es igual a $CW_{\min}$. El tamaño del intervalo crecerá duplicado si el intento de transmisión subsiguiente falla, hasta llegar a un límite máximo igual a $CW_{\max}$, el contador de *backoff* se decrementa al final de cada ranura de tiempo, mientras que el medio se encuentre inactivo, si durante la cuenta atrás del *backoff* el canal se detecta como ocupado, la cuenta atrás se detiene, y se reanuda cuando el canal este inactivo durante un periodo de tiempo de acuerdo a la AC, la trama se transmite cuando el temporizador de *backoff* llegue a cero [17].

El problema del nodo oculto

El problema del nodo escondido surge cuando dos nodos que no tienen alcance de radio entre sí, interfieren la recepción de un tercero (en alcance de radio de ambos) cuando transmiten en simultáneo. Al no estar en alcance de radio, ambos nodos censan el canal como libre al momento de transmitir. Sin embargo, en el tercer nodo sí están llegando las dos señales cuya superposición hacen imposible la decodificación [18].

Como solución a este problema 802.11 implementa el sistema de petición para enviar (RTS, *Request To Send*) y borrar para enviar (CTS, *Clear To Send*) que consiste en el envío de una trama RTS al destino para indicar que se desea mandar tráfico. Una vez que la estación oculta recibe el RTS lo reenvía a los nodos que están a su alcance para indicar que se va a reservar el canal para esta comunicación. De esta forma la estación de destino está informada de que tiene que esperar antes de mandar los paquetes.

Este mecanismo evita colisiones, pero introduce una sobrecarga de tráfico en la red y retardo en las transmisiones. Por esas razones, WAVE no implementa RTS/CTS en el canal CCH por transmitir en modo *broadcast*. Como consecuencia, todos los nodos que utilizan

el canal de control están sujetos al problema del terminal escondido, incrementando el riesgo de pérdidas de paquetes y de congestión de canal.

Beaconing

Las aplicaciones de Conocimiento Cooperativo (*Cooperative Awareness*) que funcionan como un radar para los vehículos cercanos, requieren el intercambio de información frecuente y de bajo retardo entre los vehículos, incluyendo datos como la posición actual, velocidad, y la aceleración. Esto se realiza mediante la difusión periódica de mensajes de un solo salto (*single-hop-broadcast*) llamados *beacons*. *Beaconing* es el proceso de soporte básico que permite el enrutamiento geográfico y la difusión de estos mensajes (Ver Figura 1.2) y se lleva a cabo en el canal de control (CCH, *Control Channel*) que es compartido por todos los nodos. Sin embargo, dado que el mensaje *beacons* es de aproximadamente de 400 bytes [19], se requiere una cantidad significativa de ancho de banda a medida que aumenta la densidad de tráfico, lo que lleva al deterioro del rendimiento de la red. Cuanto mayor sea la frecuencia y, por tanto, la exactitud, mayor será el consumo de ancho de banda [20].

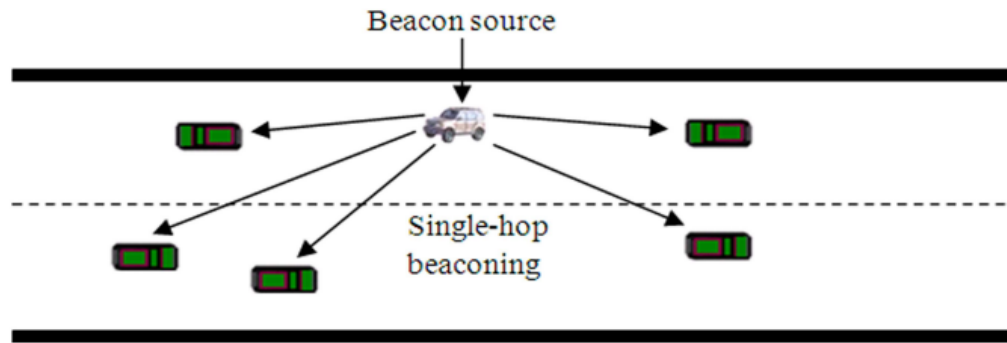


Figura 1.2. Proceso de Beaconing.

Broadcast en el canal de control

El canal de control está destinado para transmitir mensajes de seguridad críticos para casos de emergencia, mensajes periódicos de *beacons* y mensajes para el establecimiento de la conexión de los canales de servicio. Una carga de tráfico en condiciones normales para el canal de control incluye la generación de estos mensajes.

Los *beacons* son indispensables para apoyar las aplicaciones vehiculares que requieran información precisa y oportuna, también son importantes para ofrecer servicios como el descubrimiento de vecinos, algoritmos de encaminamiento proactivos, o estrategias de difusión de seguridad inteligentes.

Para cumplir los requisitos de dichas aplicaciones, la tasa de generación típica de *beacons* es de 10 Hz [20], es decir, una vez cada intervalo de sincronización WAVE. Esto implica una gran carga en el canal cuando la cantidad de vehículos es alta, para evitar dicha carga podemos encontrar en la literatura adaptaciones en la potencia de transmisión o en la tasa de generación de *beacons*.

Todos los paquetes provenientes de la capa de aplicación son enviados a la capa MAC solo durante el intervalo del canal de control. Además, para evitar que múltiples dispositivos transmitan simultáneamente, todas las transmisiones se retrasan un *backoff* al azar en el comienzo del intervalo del canal de control [17].

1.5 Requisitos de Seguridad

➤ Autenticación

En una comunicación vehicular cada mensaje debe ser autenticado, para asegurarse de su origen y de controlar el nivel de autorización de los vehículos, para ello cada vehículo tiene que firmar su mensaje con una clave privada y adjuntar su correspondiente autoridad certificadora. Por lo tanto, cuando otro vehículo recibe este mensaje, se verifica la clave utilizada para firmar el mensaje y, una vez que esto se hace correctamente, se verifica el mensaje [21].

➤ Disponibilidad

La red vehicular debe estar disponible todo el tiempo debido a que muchas aplicaciones de redes vehiculares se realizan en tiempo real. Estas aplicaciones necesitan una respuesta más rápida a partir de las redes de sensores o incluso una red ad hoc, una demora de segundos en algunas situaciones provocarían una alteración en el mensaje y el resultado podría ser devastador [10].

➤ Mecanismo de No Repudio

No repudio facilitará la capacidad de identificar a los atacantes incluso después de que ocurre el ataque. El atacante no puede negar su autoría.

➤ Integridad

La integridad de todos los mensajes debe ser protegido para evitar alteraciones por los atacantes, y el contenido del mensaje sea de confianza.

➤ Confidencialidad

La privacidad de cada conductor debe ser protegido; los mensajes deben ser encriptados para evitar que otras personas filtren la información de los conductores [10].

1.5.1 Mecanismos de Seguridad

Las propuestas de seguridad se centran en aspectos concretos del problema. Se identifican algunos aspectos clave que deberán ser cubiertos por cualquier política de seguridad en redes ad-hoc: control de acceso, sistema de detección de intrusos (SDI, *Intrusion Detection System*) y servicios de gestión de claves [6].

➤ Control de Acceso.

El control de acceso consiste generalmente en la autenticación de los usuarios de la red. Es decir, para acceder a la red y a sus servicios, un usuario debe identificarse de forma unívoca y la red lo autentica como autorizado para el acceso [6].

➤ Sistemas de Detección de Intrusos

Este sistema hace referencia a un mecanismo que, sigilosamente, escucha el tráfico en la red para detectar actividades anormales o sospechosas, y de este modo, reducir el riesgo de intrusión. Con el fin de realizar una eficaz detección de intrusos, en cada nodo existen diferentes módulos encargados de recoger los datos de auditoría en las diferentes capas. Los diferentes módulos son: módulo de control de la capa de red y enrutamiento, módulo de información de contexto, módulo de evaluación de la solicitud, módulo de acción y módulo para la comunicación con los sistemas de detección de intrusos en otros nodos [22].

➤ Cifrado y Gestión de Claves

El empleo de técnicas de cifrado y de firmas digitales como mecanismo de seguridad requiere el uso de claves criptográficas, que serán compartidas por todos los nodos. En

esquemas de VANETs pura, sin red de respaldo, es más apropiado usar un esquema de gestión de clave que no depende de ninguna entidad externa. En cambio, si se dispone de una red de respaldo, se puede optar por esquemas de tipos centralizados [6].

1.6 Conjunto de protocolos para VANETs

Son muchos los grupos de trabajo que estudian el tema de las comunicaciones destinadas al transporte y cada uno hace sus propuestas [18]. Organismos como el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*), la Organización Internacional de Normalización (ISO, *International Organization for Standardization*) y el Consorcio de Comunicaciones Vehículo a Vehículo (C2C-CC, *Car to Car Communication Consortium*) están trabajando en propuestas de arquitecturas ITS [23].

Algunas de las arquitecturas para redes VANETs se observan en la Figura 1.3 [7]. Acceso Inalámbrico en Entornos Vehiculares (WAVE, *Wireless Access in Vehicular Environment*) introducido por el IEEE, Acceso a la Comunicación para Móviles Terrestres (CALM, *Communication Access for Land Mobiles*) por la ISO, y C2C-CC respaldado por industrias europeas de automóviles. Estas arquitecturas pueden funcionar en la banda de frecuencias de 5.9 GHz.

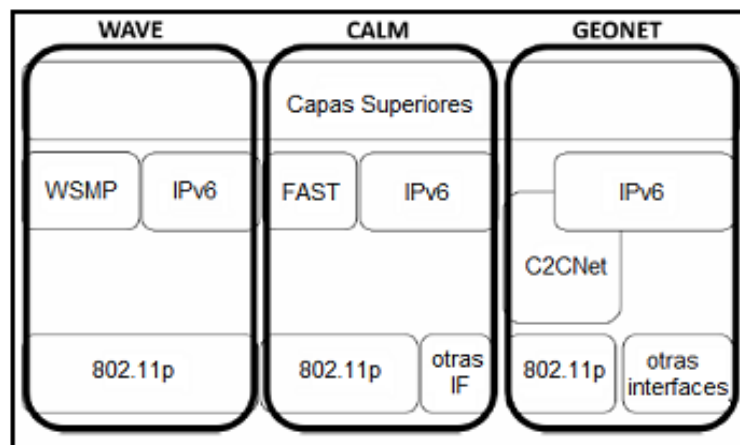


Figura 1.3. Arquitecturas VANETs.

1.6.1 Arquitectura WAVE

IEEE introduce un conjunto de protocolos llamado WAVE basada en la familia de estándares IEEE 1609, donde se definen seis sub-estándares, enumerados del uno al seis. Cada uno con diferentes propósitos en distintas capas [23].

El estándar 1609.1 detalla las actividades de gestión de recursos requeridas para las operaciones propias de las aplicaciones, definiendo el flujo de datos y recursos; así como también los formatos de los mensajes y almacenamiento de datos. 1609.2 describe las consideraciones tomadas en cuenta para la seguridad en las comunicaciones. 1609.3 define los servicios de la capa de red y transporte incluyendo direccionamiento y enrutamiento, a la vez que provee el protocolo WSMP, ofreciendo una eficiente alternativa para IP. 1609.4 define la coordinación entre los múltiples canales del espectro radioeléctrico. 1609.5 especifica los servicios de gestión en la comunicación inalámbrica entre los dispositivos OBUs y RSUs, para el acceso inalámbrico en entornos vehiculares. Por último, el estándar 1609.6 ofrece una capa intermedia entre la capa de transporte y de aplicación [7].

1.6.2 Arquitectura C2C-CC

Es una organización sin fines de lucro iniciada por fabricantes europeos de automóviles con el objetivo de desarrollar un estándar industrial abierto para la comunicación entre vehículos. El consorcio tiene como objetivo incrementar la seguridad vial [23].

C2C-CC diseñó el protocolo C2CNet que difiere de IP, y puede ser usado por aplicaciones de seguridad y de no seguridad, como también para las comunicaciones basadas en infraestructura y sin infraestructura.

La mayoría de comunicaciones V2V y V2I, no requieren una dirección IP. Todos los nodos tienen que ser capaces de determinar su posición, partiendo de esta base y dentro del rango del emisor, el nodo más cercano al destino será el encargado de retransmitir el paquete. Este proceso se llama encaminamiento geográfico. Con la finalidad de soportar las aplicaciones de confort y entretenimiento que requieren acceso a Internet o que funcionan sobre la tecnología IP, el sistema es totalmente compatible con la pila de protocolos TCP/IP [24]. La capa de red C2CNet provee comunicación multisalto basada en este proceso.

Para el problema de congestión se requieren características no incluidas en el estándar 802.11 como por ejemplo que la capa MAC C2C debe proveer información sobre la carga estimada del canal a las capas superiores. De acuerdo a ésta información las capas superiores deben adoptar estrategias para reducirla, como por ejemplo que la capa de aplicación decida si transmitir o no de acuerdo a la congestión existente [18]. La Figura 1.4 muestra un esquema de dicha arquitectura.

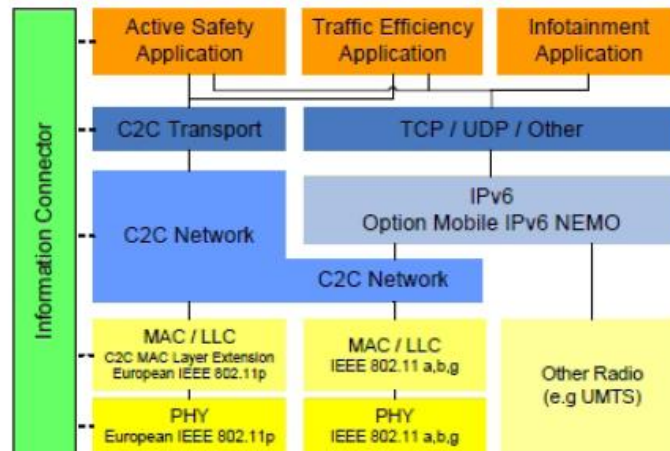


Figura 1.4. Arquitectura C2C-C

1.6.3 Arquitectura CALM

CALM es una arquitectura marco de ISO para dar soporte a comunicaciones en entornos móviles. Está basado en IPv6 y proporciona un conjunto de protocolos y parámetros estandarizados para las comunicaciones inalámbricas de medio y largo alcance de alta velocidad (Figura 1.5).

La funcionalidad de CALM consiste fundamentalmente en dar soporte a servicios de Internet en entornos móviles y a la nueva generación de aplicaciones ITS: sistemas de comunicaciones para seguridad en vehículos y nuevas aplicaciones comerciales basadas en su capacidad de gran ancho de banda y amplio alcance [12].

Esta arquitectura es capaz de determinar en todo momento qué tecnología inalámbrica está disponible en una cierta localización y decidir cuál utilizar para una comunicación óptima. Por otra parte siempre garantiza varios canales de comunicación de forma simultánea, de esta forma los vehículos y la infraestructura pueden mantener una comunicación de forma continua, incluso si algún canal individual no se encuentra disponible [25].

CALM está compuesto por una serie de estándares internacionales en este ámbito, y soporta comunicaciones continuas a través de distintos interfaces y medios físicos como los IEEE 802.11, 802.11p, 802.15, 802.16e, 802.20, telefonía móvil 2G/3G/4G, o los sistemas propietarios de los programas ITS nacionales. Más específicamente, los medios físicos utilizados para dar soporte a la arquitectura CALM son (Figura 1.5):

- ISO 21212: 2G Cellular (GSM)
- ISO 21213: 3G Cellular (UMTS)
- ISO 21214: InfraRed
- ISO 21215: M5 (802.11p)
- ISO 25112: WiMAX (802.16e)
- ISO 25113: HC-SDMA (802.20)
- Bluetooth (802.15)
- Ethernet (802.3)
- DSRC

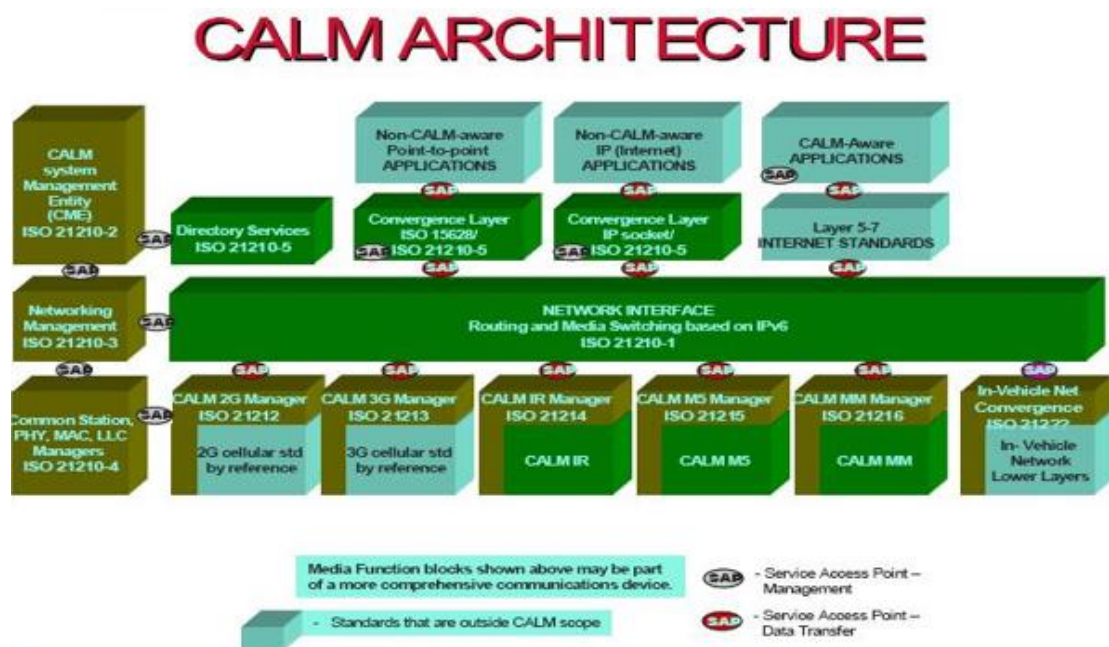


Figura 1.5. Arquitectura CALM

1.7 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se realizó un estudio general de las redes VANETs y el estado de desarrollo en el cual se encuentra, tratando temas como las características y desafíos actuales, así como las diferentes arquitecturas que desarrollan las comunicaciones en entornos vehiculares. También se presentaron las características y el funcionamiento del estándar IEEE 802.11p. Se estudiaron las principales aplicaciones que hacen a estas redes un tema sugestivo para su estudio y se abordó el tema de la seguridad y los conjuntos de protocolos que trabajan en las redes de vehículos.

CAPÍTULO 2. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN Y DISEÑO DE LOS EXPERIMENTOS

2.1 Simuladores

La simulación en redes vehiculares constituye una herramienta valiosa para analizar y evaluar la viabilidad, los beneficios y las bondades de la implementación de las aplicaciones en los sistemas de transporte inteligentes. El grado de realismo y confiabilidad de los resultados de la simulación dependen fundamentalmente de dos aspectos: la integración de un simulador de red con un simulador de movilidad y el uso de métricas adecuadas para la evaluación de los resultados [26].

Por otra parte, la simulación en redes VANET es el método preferido para comprobar resultados de análisis debido a limitaciones económicas y físicas. Los tipos de simuladores existentes para redes VANET son: Simuladores de tráfico vehicular, Simuladores de Red, Simuladores Híbridos y Simuladores Integrados [27].

- **Simuladores de Tráfico**

La función del simulador de tráfico es generar un modelo de movilidad en un escenario topográfico real, donde se muestran las posibles trayectorias de los nodos, teniendo la velocidad de los vehículos, la densidad del tráfico, topología vial, entre otros [28]. Además, ofrecen la posibilidad de generar trazas de movimiento y en varios de trazas pueden ser utilizadas por simuladores de red.

- **Simulador de Red**

El simulador de red constituye una herramienta para modelar y evaluar el desempeño de ciertos componentes de los sistemas de comunicación (como estándares, protocolos,

algoritmos, configuraciones de parámetros, etcétera.), con el fin de realizar pruebas del diseño sin efectuar la implementación real [29].

- Simuladores Híbridos

Los simuladores híbridos integran simuladores de tráfico o movilidad con simuladores de redes a través de una interfaz diseñada para ello. En este caso ambos simuladores se ejecutan en paralelo lo que permite que se comuniquen dinámicamente entre sí mediante la alteración de los patrones de movilidad basados en los flujos de red y viceversa. Lo que nos permite utilizar las mejores prestaciones de ambas herramientas, agrupando modelos de movilidad de última generación con simuladores de redes actuales y eficientes.

- Simuladores Integrados

Los simuladores integrados surgieron con el fin de unificar en una sola herramienta las funcionalidades de simuladores de tráfico y de red, debido a que en ocasiones la ejecución en paralelo de estos últimos consumía numerosos recursos. El principal objetivo de estos simuladores es tener ambos modelos trabajando e interactuando eficientemente. Sin embargo, la principal desventaja es precisamente la mala calidad del simulador de red. Además, no permiten aún incorporar mapas públicos de OpenStreetMap [27].

Los simuladores seleccionados para el desarrollo de las simulaciones fueron: SUMO y MOVE como simuladores de tráfico; OMNeT++ como simulador de red y VeINS como simulador híbrido.

- SUMO

Simulación de Movilidad Urbana (SUMO, *Simulation for Urban MObility*) [30], permite la simulación de tráfico para manejar grandes redes de carreteras [31]. Se trata de un paquete de software de código abierto (mucha documentación, gratuito) para simulación de tráfico microscópico y multimodal.

La primera cualidad indica que cada vehículo que se mueve por la red simulada es modelado individualmente y está caracterizado por una cierta posición y velocidad [32], es decir, que SUMO es capaz de adoptar un movimiento diferente a cada vehículo del escenario haciendo así un entorno más próximo a la realidad, dónde el modelo matemático

que implementa este comportamiento microscópico es el de *car-following* desarrollado por Stefan Krauss.

Con una simulación multimodal se refiere a que no solo se modelan los movimientos de los coches, sino también los sistemas de transporte público [33]. La simulación de los vehículos se hace de forma discreta en el tiempo y continua en el espacio, en el sentido que en cada instante de tiempo discreto de la simulación la posición de cada vehículo estará perfectamente descrita [34].

Este software es altamente portable, y consta tanto de una consola que permite introducir los comandos correspondientes para ejecutar las simulaciones, así como de una interfaz gráfica (GUI, *Graphical User Interface*) que permite visualizar e interactuar con el *output* de la simulación de tráfico. Se trata de un simulador que permite definir entornos de movilidad reales gracias a la utilización de mapas digitales, ofrece la posibilidad de utilizar diferentes tipos de vehículos, carreteras que cambian en cuanto a su composición (carriles, velocidad, prioridades, etc.) y un amplio abanico de posibilidades e integración con otros simuladores debido a que es código abierto.

Su plataforma de programación es C++, permitiendo la simulación vehicular en entornos urbanos y de autovías. Para la parte de generación del tráfico, la asignación de rutas se puede o bien generar manualmente o bien ser importadas de los datos de la vida real. SUMO permite la importación de diversos mapas topológicos provenientes de herramientas como TIGER, GIS Arcview, OpenStretMap o incluso VISSIM [35].

SUMO es también capaz de generar trazas de salida directamente utilizables por los simuladores de red, haciendo uso de la herramienta MOVE.

➤ MOVE

Generador de modelos de Movilidad para redes Vehiculares (MOVE, *MObility model generator for VEhicular networks*) es un generador de modelos de micro tráfico que funciona sobre el simulador de micro-tráfico SUMO [12]. Esta herramienta logra transformar la salida del generador de tráfico en trazas legibles por parte de los simuladores de redes a través de una interfaz gráfica desarrollada por Java [36]. La interfaz permite al usuario generar los archivos XML para construir rápidamente escenarios de simulación

realistas sin la molestia de escribir guiones de simulación, así como conocer los detalles internos del simulador [35].

MOVE consta de dos componentes principales: el editor de mapas y un editor de tráfico de vehículos. El editor de mapas se usa para generar la topología; esta puede ser implementada de tres formas distintas: creada manualmente por el usuario, generada automáticamente o importada a partir de mapas reales. El editor de tráfico de vehículos permite al usuario definir un destino dentro del mapa editado, así como la ruta a seguir dentro de ese mapa para llegar al objetivo, y al igual que el editor de mapas, el tráfico puede generarse de forma manual o automática [24].

Entre sus características destaca la posibilidad de configurar los movimientos de los vehículos, velocidades, número de vehículos, capacidad de tráfico y prioridad del mismo para cada calle [34].

➤ OMNeT++

OMNeT++ es una herramienta extensible y modular, basada en la simulación de modelos implementados con componentes programados en C++ y dedicada principalmente a la creación de simulaciones de red [37]. El nombre OMNeT++ significa Banco de pruebas de Red Modular Objetivo en C++ (OMNeT++, *Objective Modular Network Testbed in C++*). El simulador utiliza el lenguaje C++ para dar funcionalidad a los objetos o módulos que forman el modelo que se va a simular, pudiendo usar diferentes librerías ya implementadas.

Un modelo de OMNeT++ consiste en una serie de módulos agrupados de manera jerárquica que se comunican a través de mensajes. Esto es posible mediante el lenguaje de programación de descripción de red (NED, *Network Description*), basado en C++. Los módulos activos se denominan módulos simples (elementos básicos) y contienen los algoritmos que permiten el funcionamiento del modelo. Estos a su vez se pueden agrupar en módulos compuestos y así sucesivamente, sin limitación, todos ellos están contenidos en el nivel superior llamado módulo del sistema.

Dichos módulos pueden contener estructuras complejas de datos y tienen sus propios parámetros usados para personalizar el envío de paquetes a los destinos a través de rutas, compuertas y conexiones [38].

Cada conexión tiene tres parámetros asociados, que sirven para facilitar el modelado de la red de comunicaciones. Estos son: el retardo en la propagación, la tasa de error de bit y la tasa de transferencia de información. De este modo se consigue personalizar el comportamiento de cada módulo y su interacción con los demás [32].

Un modelo de simulación de OMNeT++ se basa en las siguientes etapas:

- Definición de la estructura y topología a simular mediante NED.
- Definición de los módulos simples mediante C++.
- Generación del modelo que consiste en la compilación de los módulos y el enlazado con la librería de simulación.
- Especificación de los parámetros concretos de la simulación.
- La ejecución del código es muy veloz, con dos entornos de ejecución: uno gráfico (*Tkenv*) que permite simulaciones paso a paso (de mensajes), o simulación de forma continua con 3 velocidades (normal, rápida y exprés) y otro a través de un intérprete de comandos (*Cmdenv*), que es más veloz que el gráfico [39].
- Como características principales ofrece:
- Permite escribir, ejecutar y depurar el código durante el tiempo de ejecución, así como presentar los resultados de la simulación.
- Ejecución paso a paso.
- Visualización de los mensajes programados en una ventana independiente.
- Examen y modificación de objetos y variables mediante las ventanas de inspección.
- Ventanas independientes para la salida de cada módulo.
- *Breakpoint*: etiquetados.

OMNeT++ ofrece una extensa colección de librerías de simulación con el propósito de cubrir las tareas más comunes de la simulación. Además, es código libre por lo que estas librerías pueden ser añadidas o modificadas según las necesidades.

Permite simular redes cableadas, inalámbricas, redes de sensores, redes ópticas, entre otras; además ofrece un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE, *Integrated Development Environment*) basado en Eclipse, y es anfitrión de diversos *frameworks* externos [27].

➤ VeINS

Vehículos en Simulación de Red (VeINS, *VEhicles In Network Simulation*) es un entorno de simulación de Comunicación Inter-Vehicular (IVC, *Inter-Vehicular Communication*) de código abierto compuesto por el simulador de redes basado en eventos OMNET++ y el generador de movilidad microscópico SUMO, trabajando acopladamente y en tiempo real.

Para llevar a cabo las evaluaciones de IVC, ambos simuladores se están ejecutando en paralelo, conectados a través de un socket TCP. El protocolo para esta comunicación se ha estandarizado como la Interfaz de Control de Tráfico (TraCI, *Traffic Control Interface*). Esto permite la simulación acoplada bidireccionalmente del tráfico por carretera y el tráfico de la red, así el movimiento de vehículos en SUMO se refleja en el movimiento de nodos en una simulación OMNeT ++. Este proceso nos brinda como ventaja la recreación de escenarios y situaciones reales como detener los vehículos para crear atascos artificiales, hacer que continúen en marcha o hacer que un vehículo cambie de carretera arbitrariamente. De esta forma VeINS, logra de forma precisa reflejar cómo un conductor que observa que una zona está atascada, trata de evitarla.

En cada instante de tiempo OMNeT++ envía todos los comandos almacenados en el búfer a SUMO y dispara la correspondiente iteración de la simulación de tráfico rodado. Una vez finalizada la simulación de tráfico para ese instante temporal, SUMO envía una serie de comandos, junto con la posición de todos los vehículos, de vuelta al módulo OMNeT++. Esto permite a OMNeT++ reaccionar en base a las trazas de movilidad recibidas, introduciendo nuevos nodos, eliminando algunos que ya hayan alcanzado su destino y, lo que es fundamental, moviendo el resto de nodos de acuerdo con lo que ha indicado su homólogo en la simulación de tráfico [32].

Con este mecanismo, ambos simuladores se encuentran funcionando de forma altamente acoplada y SUMO sólo puede realizar un nuevo paso de simulación una vez que el simulador de red ha sido capaz de procesar todos los eventos correspondientes al instante actual [32].

2.1.1 Instalación de MOVE y SUMO

Para la instalación de MOVE es necesario descargar y descomprimir el simulador MOVE y copiarlo al directorio elegido, en este caso en la carpeta “Veins” dentro del disco local C, de modo que tenga la siguiente dirección: *C:\Veins\MOVE*. Para configurar los parámetros de tráfico de las simulaciones solo debemos acceder a su interfaz gráfica. (Ver Figura 2.1).

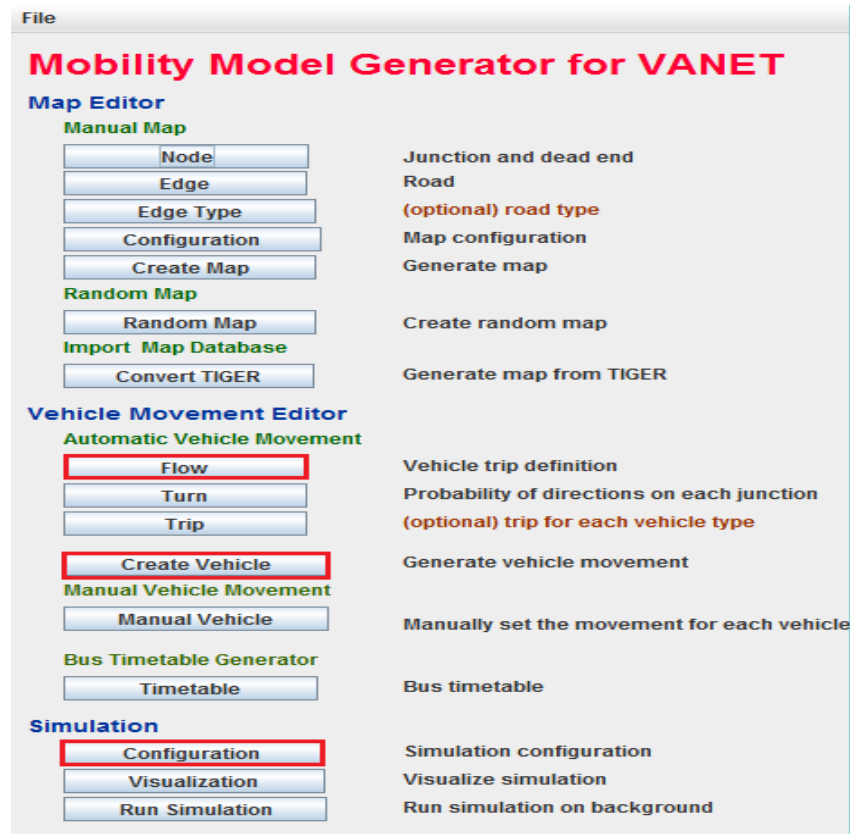


Figura 2.1 Interfaz gráfica de MUVE

Con SUMO se realiza un procedimiento similar, copiando y descomprimiendo el simulador SUMO versión 0.15.0 en el mismo directorio que MOVE de manera que se pueda acceder a él de la siguiente dirección: *C:\Veins\sumo-winbin-0.15.0*. Dentro de esta carpeta se encontrarán todos los documentos necesarios para el funcionamiento de la herramienta incluyendo la interfaz sumo-gui que se muestra en la Figura 2.2 donde se realizarán las simulaciones de tráfico.

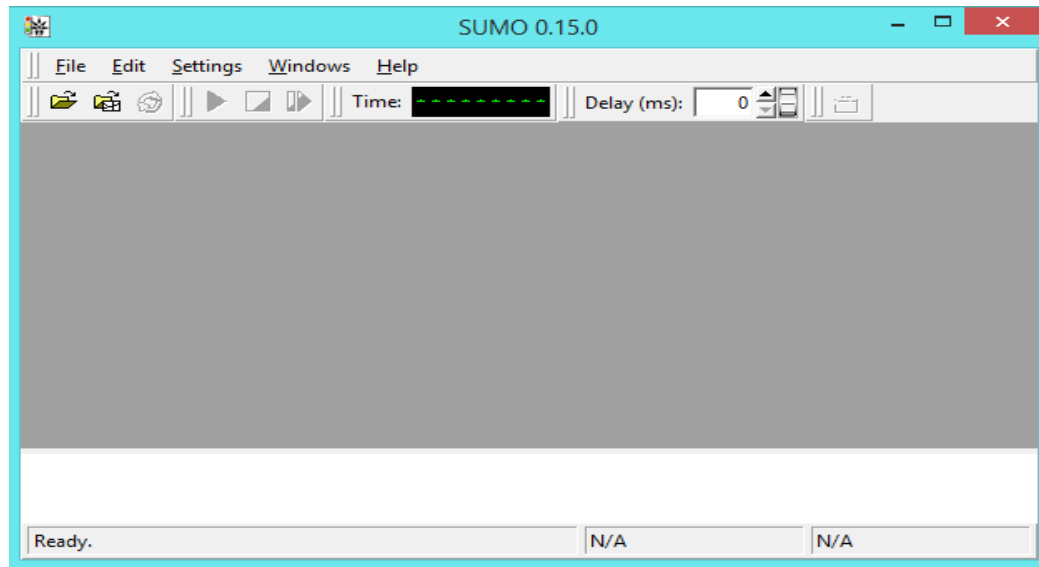


Figura 2.2 Interfaz gráfica de SUMO

2.1.2 Instalación de OMNeT ++

OMNeT ++ permite la simulación de redes de comunicaciones cableadas e inalámbricas. La ventaja de éste simulador sobre otros es la gran cantidad de módulos independientes creados para dar soporte a funciones específicas y que se integran de manera natural. Su interfaz gráfica denominada *TKenv* permite tener una visión completa de la red que se desea implementar además con la importación de veins se genera el proyecto mixim en el explorador de proyectos de OMNeT donde se almacenan los ejemplos y los resultados de las simulaciones realizadas.

Para la implementación del simulador primero se debe instalar en la PC el driver "*Microsoft Visual C++.2012. Redistributable Package*" dado que OMNeT++ es un simulador de red basado en C++, luego es necesario descargar el programa OMNeT++ versión 4.2.2 y descomprimir dicho archivo en la carpeta "Veins" y así obtener todos los archivos necesarios para su instalación. De la dirección "*C:\Veins\omnetpp-4.2.2*" ejecutar el comando *mingwenv.cmd* para abrir la consola de configuración de OMNeT++ y comenzar la instalación del *software* siguiendo los siguientes pasos:

1. Ejecutar los comandos siguientes dentro de la consola de configuración. Ver figura 2.3.
 - ✓ *.configure.*
 - ✓ *./configure.*



```
MINGW32:~
Welcome to OMNeT++ 4.2.2!
Administrador@Tele-tec ~
$ .configure
sh: .configure: command not found
Administrador@Tele-tec ~
$ ./configure
checking build system type... i686-pc-mingw32
checking host system type... i686-pc-mingw32
configure: -----
configure: reading configure.user for your custom settings
configure: -----
```

Figura 2.3. Configuración de OMNeT ++.

2. Una vez terminada la configuración se ejecuta el comando *make* para construir los archivos necesarios para que OMNeT++ pueda funcionar (Figura 2.4).



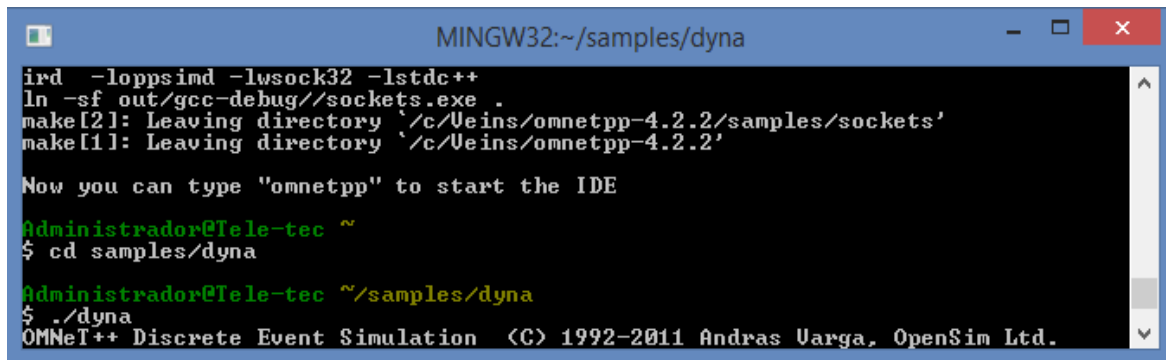
```
MINGW32:~
Scroll up to see the warning messages (use shift+PgUp), and search config.log
for more details. While you can use OMNeT++ in the current configuration,
be aware that some functionality may be unavailable or incomplete.

Your PATH contains c:/Veins/omnetpp-4.2.2/bin. Good!
TCL_LIBRARY is set. Good!
Administrador@Tele-tec ~
$ make
```

Figura 2.4. Construcción de OmMNeT ++.

3. Para verificar que la instalación se ha terminado con éxito, se ejecuta el ejemplo “dyna” de la siguiente forma (Ver Figura 2.5):

- ✓ *cd samples/dyna*
- ✓ *./dyna*



```
MINGW32:~/samples/dyna
ird -lloppsimd -lwssock32 -lstlcpp
ln -sf out/gcc-debug//sockets.exe .
make[2]: Leaving directory '/c:/veins/omnetpp-4.2.2/samples/sockets'
make[1]: Leaving directory '/c:/veins/omnetpp-4.2.2'

Now you can type "omnetpp" to start the IDE

Administrador@Tele-tec ~
$ cd samples/dyna
Administrador@Tele-tec ~/samples/dyna
$ ./dyna
OMNeT++ Discrete Event Simulation (C) 1992-2011 Andras Varga, OpenSim Ltd.
```

Figura 2.5. Comprobación de la instalación

4. Al ejecutar este ejemplo se debe abrir la ventana de la interfaz gráfica *TKenv* y se escoge una de las opciones como se muestra en la Figura 2.6 y se da paso al escenario de simulación de la Figura 2.7, culminando así el proceso de instalación.

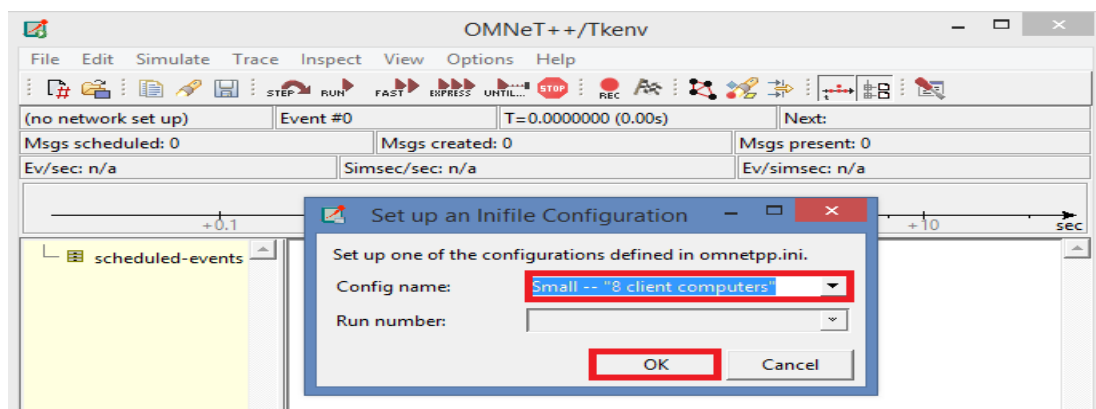


Figura 2.6. Interfaz gráfica de OMNeT++.

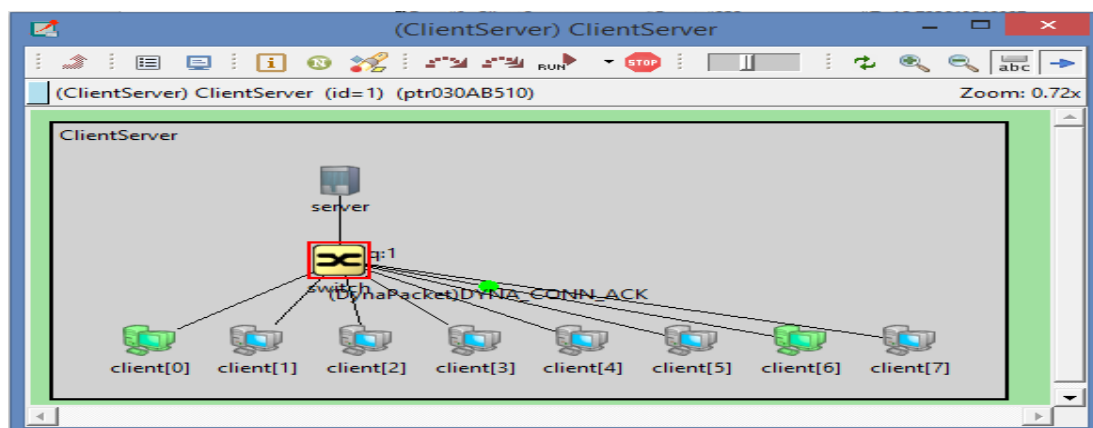


Figura 2.7. Simulación del ejemplo dyna en OMNeT++.

Importando el proyecto veins

1. Se copia el archivo veins-2.0 dentro de la carpeta Veins del directorio C:\ obteniéndose finalmente el siguiente directorio C:\Veins\veins-2.0.
2. Se abre la interfaz gráfica de OMNeT++ desde el directorio C:\Veins\omnetpp-4.2.2\ide con omnetpp.

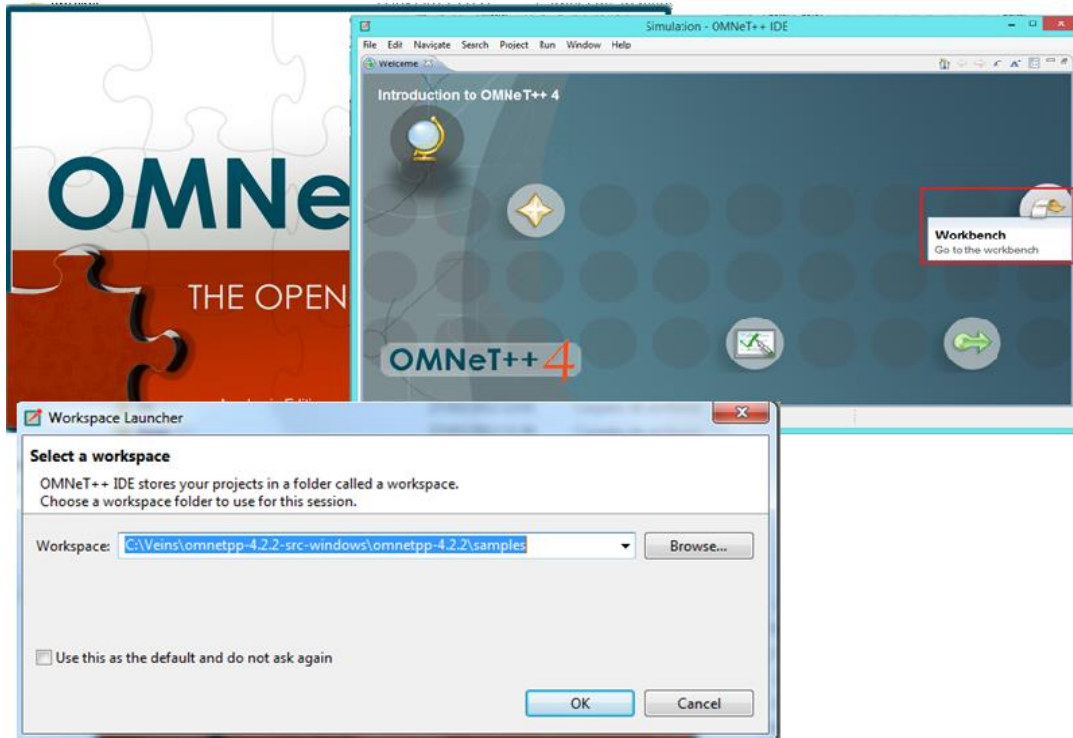
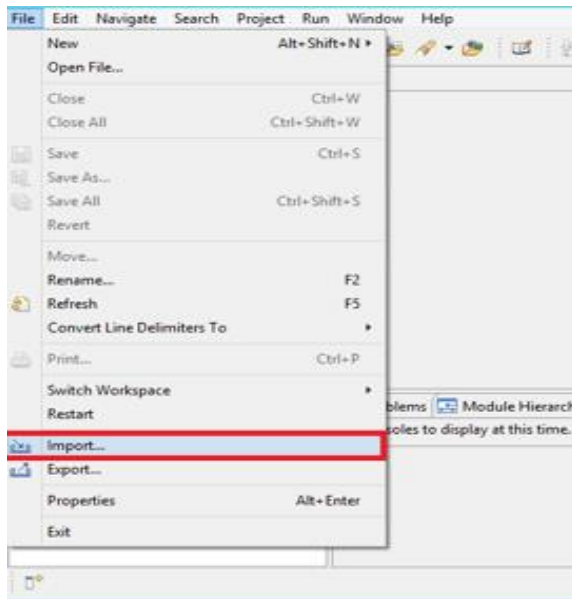


Figura 2.8. Proceso de ejecución de OMNeT++.

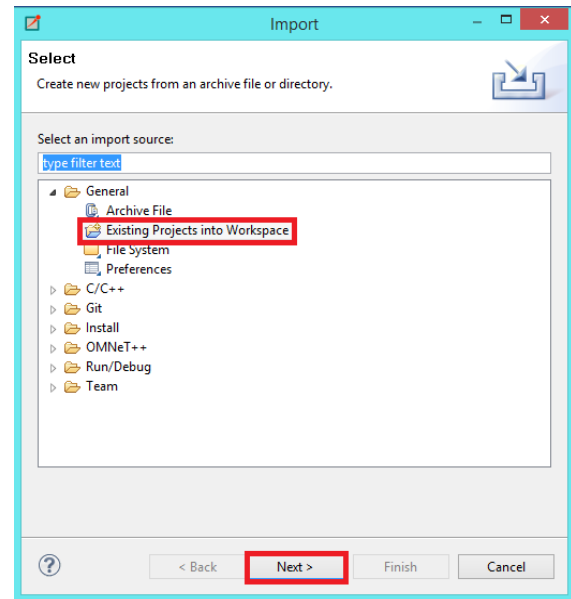
3. Una vez abierta la interfaz se procede a importar el proyecto veins-2.0. Se da clic en File>Import y se selecciona General>Existing Projects into Workspace en la ventana que se abre, luego en Select root directory se escoge el directorio de veins, para éste caso C:\Veins\veins-2.0., luego se da clic en Finalizar. Mediante este proceso se creará el proyecto mixim.
4. Se da clic derecho sobre mixim y se carga el proyecto con la opción Buil Project como se muestra en la Figura 2.9.
5. Por último, se debe configurar el puerto que permite la comunicación entre Sumo y OMNeT++. Para ello abrimos la consola de configuración mingwenv y se ejecuta el

comando siguiente: `/c/Veins/veins2.0/veins2.0/somo-launchd.py -vv -c /c/Veins/sumo-winbin-0.15.0/sumo-0.15.0/bin/sumo-gui.exe` (Ver Figura 2.10).

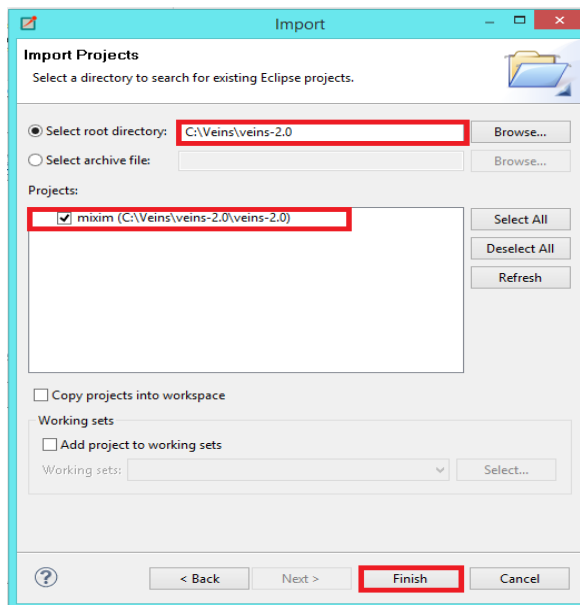
6. Luego de estos pasos se puede proceder a simular corriendo el ejemplo `veinsc2c`: `mixim/examples/veinsc2c/omnetpp.ini/Run As/1 OMNeT ++ Simulation`.



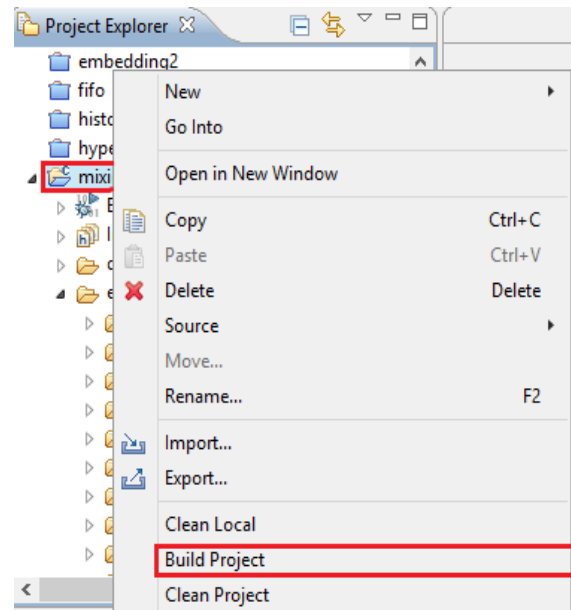
a)



b)

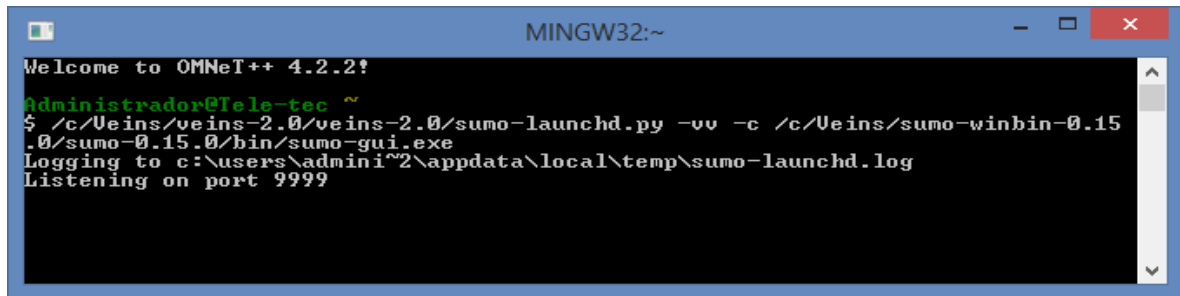


c)



d)

Figura 2.9. Inimportación del proyecto veins-2.0



```
MINGW32:~
Welcome to OMNeT++ 4.2.2!
Administrador@Tele-tec ~
$ /c/veins/veins-2.0/veins-2.0/sumo-launchd.py -vv -c /c/veins/sumo-winbin-0.15
.0/sumo-0.15.0/bin/sumo-gui.exe
Logging to c:\users\admini~2\appdata\local\temp\sumo-launchd.log
Listening on port 9999
```

Figura 2.10. Configuración del puerto de interconexión entre SUMO y OMNeT++.

2.2 Simulación

Se utiliza el simulador híbrido VeINS que acopla el simulador de red OMNeT++ y el simulador de tráfico SUMO con el propósito de realizar experimentos que permitan evaluar el impacto del tamaño de la CW del protocolo IEEE 802.11p en escenarios vehiculares. Los experimentos se desarrollan sobre una porción del mapa real, en este caso se escogieron dos entornos: urbano y autopista ubicados en la ciudad de Chicago. Los mapas se descargaron del sitio <http://www.openstreetmap.org/> descargando dicha localización en un archivo *.osm que no es compatible con MOVE por lo que se convierte a extensiones *.net.xml y *.poi.xml con la configuración de red y polígonos de cada escenario (Ver Anexo 1), donde se configuran los parámetros de tráfico para obtener al final un archivo *.sumo.cfg que corresponde a la información de rutas, densidades, velocidades, tipos de vehículo, etc.

2.2.1 Parámetros de simulación

Todos los vehículos presentes en las simulaciones están equipados con tecnología VANETs y presentan el nivel físico y de control de acceso al medio del protocolo IEEE 802.11p. En cada simulación los vehículos realizan la difusión periódica de información de estado utilizando una de las siguientes frecuencias de transmisión: mínima (1 Hz) y media (5 Hz). Los dispositivos de comunicación inalámbrica implementados transmiten los *beacons* a través del canal de control (CCH 178) que es compartido por todos los nodos de la red. No se produce el intercambio de información en el canal de servicio SCH1. Los vehículos tienen 5 m de longitud, 2 m de ancho, 1.5 m de altura, aceleración de 0.8 m/s², desaceleración de 4.5 m/s², velocidad máxima de 50 m/s y la movilidad vehicular se simula con el modelo de seguimiento de automóvil de Krauss. Las antenas transmisoras y

receptoras se ubican en la parte superior frontal del vehículo y son omnidireccionales. Se utilizan cuatro valores de ventana de contención: 3, 7, 15 y 1023. La transmisión de los datos en el canal de radio se realiza a 6 Mbits/s y en cada simulación se combina una frecuencia de transmisión, un valor de CW y un valor de densidad o velocidad promedio en dependencia del escenario que se esté analizando. Los parámetros de las simulaciones se recogen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Parámetros de 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 Mbps
Potencia de Transmisión	95 mW
Sensibilidad del Receptor	-82 dBm
Ruido Térmico	-110 dBm
MAC – PHY	IEEE 802.11p
Mecanismo de elección de trama	Decider 802.11p
Intervalo CCH/SCH*	50 ms
CW	3, 7, 15, 1023
Tiempo de una ranura*	13 μ s
SIFS*	32 μ s
Frecuencia de beacon	1, 5 Hz
Tamaño de beacon	4096 bits
Prioridad de beacon	AC_0
Tamaño máximo de cola (MAC)	100 tramas
Posición de la antena (veh)	Parte superior frontal
Tipo de antena	Omnidireccional
Largo del vehículo	5 m
Ancho del vehículo	2 m
Altura del vehículo	1.5 m
Velocidad máxima (veh)	50 m/s
Aceleración máxima (veh)	0.8 m/s ²
Desaceleración máxima (veh)	4.5 m/s ²
Imperfección del conductor	$\sigma = 0.5$
Modelo de movilidad (veh)	CarFollowing-Krauss
Intervalo de actualización de posiciones	0.1s
Tiempo de simulación	1000s entorno urbano 2500s entorno autopista

2.2.2 Escenarios de simulación

➤ Entorno de simulación Urbano Chicago.

La Tabla 2.2 muestra la configuración de los principales parámetros del escenario Urbano Chicago. El mapa consiste de una porción de área urbana de 0.64 Km^2 que cuenta con un gran número de semáforos e intersecciones. Para la simulación se plantean tres hipótesis de densidades de nodos. Cada una de ellas está compuesta por 12 flujos diferenciados según su prioridad en principal y secundario. Las rutas secundarias tienen una densidad equivalente a $\frac{1}{2}$ de la densidad de las principales. Como resultado tenemos tres simulaciones de tráfico de diferentes densidades D1, D2 y D3 con un número de vehículos de 50, 75 y 100 en las vías principales y 25, 37 y 50 en las vías secundarias, lo que acumula un total de nodos en el área de 500, 748 y 1000 en un tiempo de simulación de 1000 segundos. La densidad de nodos (D_n) se define como el promedio del número de vehículos que circulan por el escenario durante el tiempo de simulación. A través de SUMO obtenemos que las densidades correspondientes a cada simulación son aproximadamente $D_{n1,2,3} = 78, 125$ y 197 veh/Km^2 .

Tabla 2.2. Parámetros del escenario Urbano Chicago.

Parámetro	Valor
Dimensiones del área	$0.64 \times 0.64 \text{ Km}^2$
Número de semáforos	9
Número de intersecciones	102
Número de flujos principales	8
Número de flujos secundarios	4
Número de vehículos/flujo principal	50, 75, 100
Número de vehículos/flujo secundario	25, 37, 50
Total de vehículos en simulación	500, 748, 1000
Densidad de nodos (veh/Km^2)	78, 125, 197

En la Figura 2.11 se observa el escenario Urbano Chicago a) muestra el escenario visto desde el sitio OpenStreetMap.org, b) y c) muestran las vistas desde los simuladores de tráfico y red y en d) se aprecia una vista ampliada del flujo de vehículos por el escenario. Las densidades y los puntos de salida y llegada de los vehículos se configuran previamente en la herramienta MOVE. Los vehículos pertenecientes a un mismo flujo tienen igual trayectoria y se desplazan siguiendo la ruta más eficiente hacia el destino mediante el

algoritmo de Dijkstra implementado en SUMO 0.15.0 La velocidad está regida por el máximo de velocidad permisible por la vía de circulación y por la aceleración y desaceleración producida por los cruces y semáforos, de modo que a medida que aumenta la densidad de los nodos, se observa mayor congestión en las intersecciones

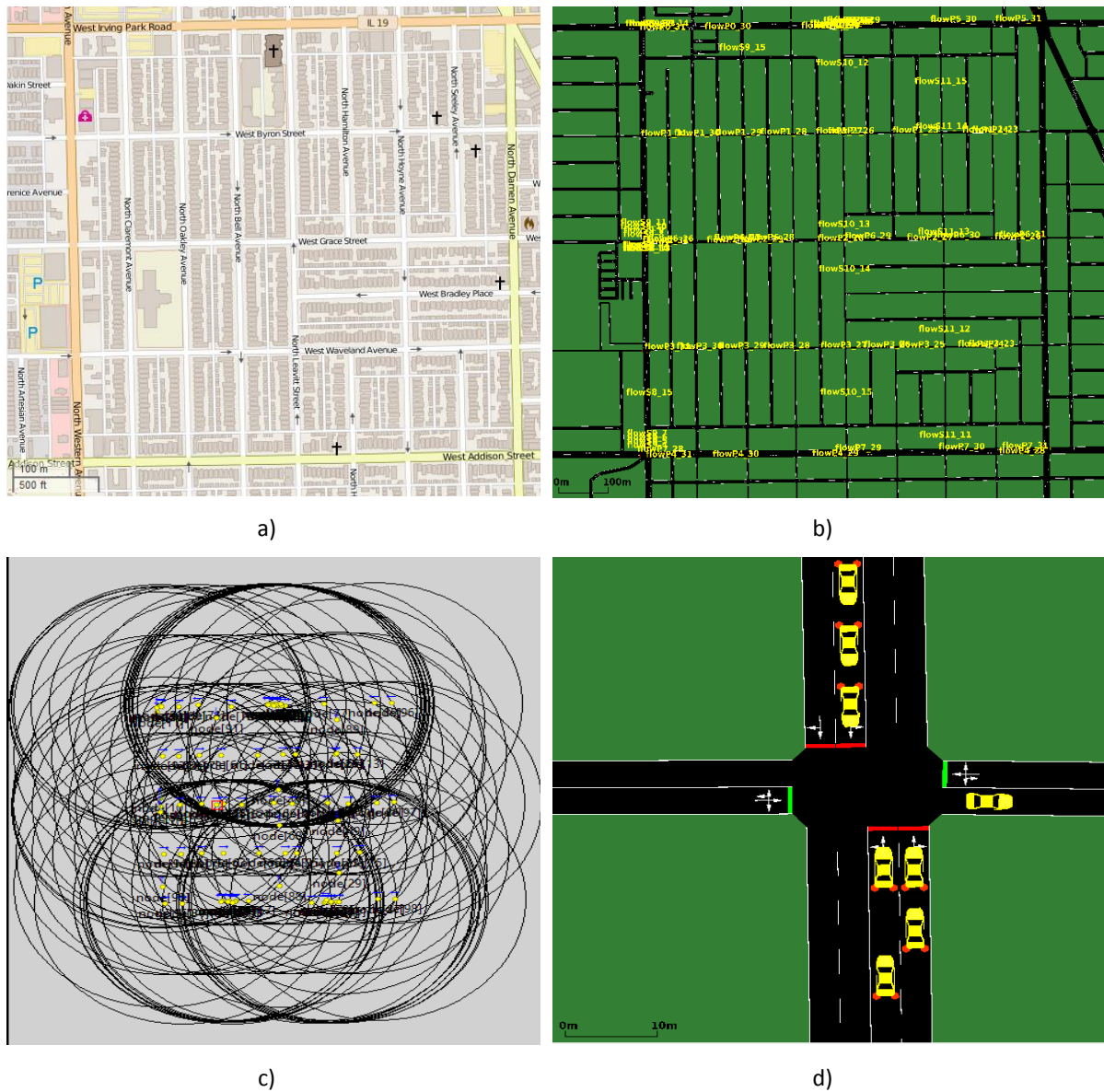


Figura 2.11. Escenario Urbano Chicago: a) Mapa en OpenStreetMap. b) Simulación en SUMO. c) Simulación en OMNeT++. d) Representación de una intercepción.

➤ Entorno de simulación autopista Chicago.

El escenario consiste de un fragmento de autopista de 10 Km de largo aproximadamente, constituida por tres carriles en ambos sentidos. Se configuraron dos flujos de vehículos, uno en cada sentido y con una densidad constante de 200 nodos para cada flujo, lo que acumula un total de 400 vehículos corriendo por el escenario en un tiempo de simulación de 2500 segundos. La Figura 2.12 se muestra el escenario Autopista Chicago. En a) se observa el mapa descargado del sitio OpenStreetMap.org, y en b) se observa el mapa desde la interfaz gráfica de SUMO. Se escogió esta porción de autopista debido a que no presenta ningún desvío ni intersección y los vehículos pueden desarrollar la máxima velocidad configurada a lo largo de la trayectoria, permitiendo la circulación de un mayor número de nodos por la vía durante el período de simulación, y de esta forma evaluar el impacto de la variación del tamaño de la CW del protocolo IEEE 802.11p en escenarios de baja y alta densidad de nodos.

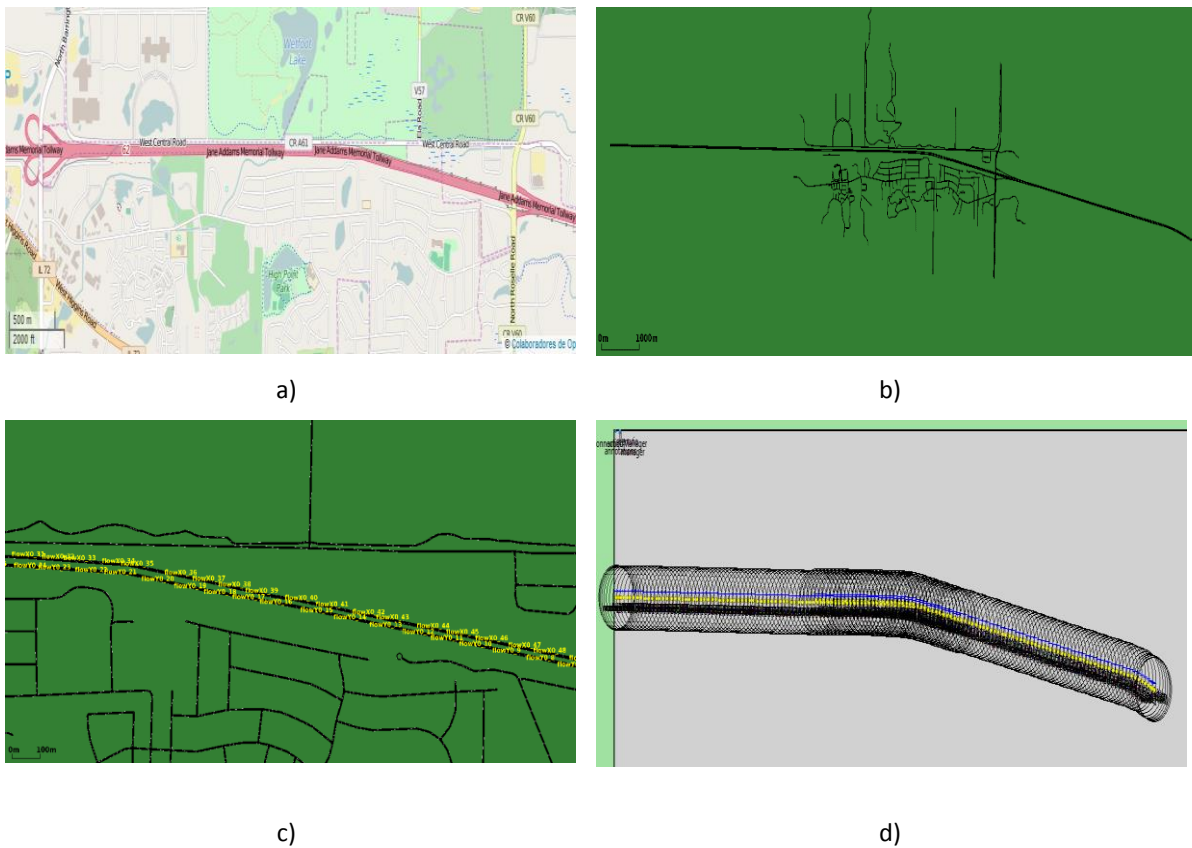


Figura 2.12. Escenario Autopista Chicago: a) Mapa de Openstretrmap. b) Vista en SUMO. c) Flujo de vehículos en SUMO d) Flujo de vehículos en OMNeT++.

Los vehículos pertenecientes al mismo flujo se desplazan del origen al destino por el mismo carril siguiendo la trayectoria definida previamente en MOVE. Ver Figura 2.12 c). Se configuraron cuatro velocidades para cada flujo: 40, 80, 120 y 160 Km/h, equivalentes a 11, 22, 33 y 44 m/s, resultando cuatro simulaciones diferentes. La velocidad de la vía es limitada a 55.6 m/s para que los vehículos desarrollen su velocidad máxima. En la Figura 2.12 d) se exhibe una vista desde el simulador de red.

Tabla 2.3. Parámetros del escenario Autopista Chicago

Parámetro	Valor
Velocidades de los nodos (Km/h)	40, 80, 120, 160
Dimensiones del área (Km)	10.902
Número de flujos	2
Número de vehículos/flujo	200
Total de vehículos en simulación	400
Velocidad máx. alcanzada de los vehículos (m/s)	11.11, 22.22, 33.33, 44.44
Velocidad promedio de los vehículos (m/s)	10.91, 22.02, 33.13, 44.24

2.3 Conclusiones del capítulo

En el capítulo se estudió el proceso de implementación del simulador VeINS que integra al simulador de red OMNeT++ y el simulador de tráfico SUMO. Se analizan las principales características y funcionalidades de las plataformas empleadas en el desarrollo de los experimentos. Se describieron los escenarios escogidos y sus parámetros de simulación para el análisis del impacto del tamaño de la CW del protocolo IEEE 802.11p en las Redes ad-hoc vehiculares.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1 Métricas de desempeño

El impacto del tamaño de la ventana de contención (CW) de IEEE 802.11p en las redes ad-hoc vehiculares se evalúa en función de las métricas siguientes:

- Número de colisiones promedio: cuando dos o más transceptores inalámbricos no se detectan y transmiten paquetes al mismo tiempo, causan colisión en el área de alcance común a los múltiples remitentes implicando la pérdida de la información. El número de colisiones promedio se determina sumando las colisiones que se producen en cada nodo y dividiendo el resultado entre el número de nodos que circulan por el escenario.
- Razón de entrega de paquetes: indica la razón que existe entre el número de paquetes recibidos por el nodo destino y el número total de paquetes enviados por el nodo transmisor.
- Error de posición máximo real: se define como el error de posición asumiendo que el evento de búsqueda de posición está uniformemente distribuido en el intervalo de tiempo inherente a la recepción de los *beacons*.

3.2 Resultados obtenidos en el entorno Urbano Chicago

3.2.1 Número de colisiones promedio

En la Tabla 3.1 se muestra el número de colisiones promedio en función de la densidad de nodos y el tamaño de la ventana de contención para las distintas densidades de nodos, cuando se usa una frecuencia de transmisión de *beacons* igual a 1 ó 5 Hz. Se observa que para un mismo tamaño de ventana de contención y frecuencia de transmisión de *beacons*, el

aumento de la densidad de nodos conduce a un mayor número de colisiones promedio. Para una misma densidad de nodos y tamaño de ventana de contención, el aumento de la frecuencia de transmisión de *beacon* eleva el número de colisiones promedio.

Para una densidad de nodos de 78 veh/Km² (Dn₁) y usando una ventana de contención igual a 3 (CW = 3) se obtienen 89 colisiones como promedio para una frecuencia de transmisión de 1 Hz y 2358 colisiones como promedio para 5 Hz. Se puede decir que para una ventana de contención igual a 3, incrementar la frecuencia de transmisión hasta los 5 Hz, implica un incremento de 2269 colisiones en cada nodo que circula por el escenario.

Al aumentar la densidad de nodos hasta 125 veh/Km², manteniendo un tamaño de ventana de contención igual a 3 (CW = 3), se obtienen 207 colisiones como promedio con 1 Hz de frecuencia y 4866 colisiones como promedio para 5 Hz de frecuencia. Esto se traduce a que un aumento en la densidad de nodos de 47 veh/Km² (Dn₂ con respecto a Dn₁) provoca un incremento de 118 colisiones para 1 Hz y 2508 colisiones para 5 Hz de frecuencia de transmisión. Para 197 veh/Km² (Dn₃) y ventana de contención igual a 3 (CW = 3) se obtienen 511 colisiones con frecuencia igual a 1 Hz y 12401 colisiones con frecuencia igual a 5 Hz, lo que evidencia que el número de colisiones para 1 Hz de frecuencia provoca 422 colisiones más por nodo (Dn₃ con respecto a Dn₁), lo que resulta pequeño en comparación con la cantidad de información de estado que se difunde por el escenario. Sin embargo, para una frecuencia de transmisión de *beacons* igual a 5 Hz se producen 10043 colisiones más en cada nodo (Dn₃ con respecto a Dn₁) lo que resulta intolerable para el desempeño de las redes ad-hoc vehiculares. Es evidente que el aumento de la densidad de nodos y la frecuencia de transmisión impacta de manera significativa en el aumento de las colisiones en las redes vehiculares, por lo que en este tipo de escenarios es recomendable usar valores medios de frecuencia (5 Hz) solo para densidades bajas de nodos para alcanzar un mayor grado de confiabilidad en la comunicación.

Se observa que para 78 veh/Km² el menor número de colisiones como promedio en ambas frecuencias de transmisión se obtiene para un tamaño de ventana de contención igual a 15 (CW = 15). Para 125 veh/Km² el menor número de colisiones para 1 Hz de frecuencia es 202 con un valor de ventana de contención igual a 15 (CW= 15), sin embargo, para 5 Hz de frecuencia el menor número de colisiones producidas es 4617 para un tamaño de ventana de

contención igual a 1023. Con el mayor número de nodos transitando por el escenario (197 veh/Km²), el menor número de colisiones que se producen es 482 para 1 Hz de frecuencia con un tamaño de ventana de contención igual a 15 (CW = 15), y para 5 Hz de frecuencia de transmisión el menor número de colisiones es 9603 con tamaño de ventana de contención igual a 1023 (CW = 1023). Se puede decir que para 1 Hz de frecuencia se debe usar un tamaño de ventana de contención igual a 15 (CW = 15) para obtener el menor número de colisiones con cualquiera de las tres densidades de nodos circulando por el escenario, no siendo así cuando se transmiten los *beacons* a una frecuencia igual a 5 Hz que ocasiona el menor número de colisiones en un escenario de baja densidad de nodos cuando se emplea un tamaño de ventana de contención igual a 15 y para densidades medias y altas en el escenario (125veh/Km² y 197 veh/Km²) se debe emplear un tamaño de ventana de contención igual a 1023 para disminuir el promedio de colisiones en el escenario y posibilitar la correcta operación de las aplicaciones de seguridad vial.

Tabla 3.1. Número de colisiones promedio en el entorno Urbano Chicago

CW	FTx	Número de colisiones promedio		
		78 veh/Km ² (Dn ₁)	125 veh/Km ² (Dn ₂)	197 veh/Km ² (Dn ₃)
3	1 Hz	89	207	511
3	5 Hz	2358	4866	12401
7	1 Hz	108	238	563
7	5 Hz	2076	4660	12513
15	1 Hz	70	202	482
15	5 Hz	2076	4715	12348
1023	1 Hz	104	212	586
1023	5 Hz	2195	4617	9603

3.2.2 Razón de entrega de paquetes

La Figura 3.1 se muestra la razón de entrega de paquetes para el entorno Urbano Chicago en función de la densidad de nodos para distintas densidades y valores de ventana de contención usando frecuencias de transmisión de *beacons* de 1 y 5 Hz. Se observa que, para un mismo tamaño de ventana de contención, un aumento en la densidad de nodos y frecuencia de transmisión de *beacons* conduce a una menor razón de entrega de paquetes. Cuando en el escenario existen 78 veh/Km², los valores más elevados de razón de entrega

de paquetes para ambas frecuencias de transmisión se obtienen para un tamaño de ventana de contención igual a 15. Cuando la densidad de nodos se incrementa hasta los 125 veh/Km cuadrados, el valor más elevado de razón de entrega de paquetes para la frecuencia de transmisión de 1 Hz, se obtiene para un tamaño de ventana de contención igual a 15, mientras que, para la frecuencia de 5 Hz, se logra con una ventana de contención igual a 1023. Cuando la densidad de nodos crece hasta alcanzar los 197 veh/Km² y se utiliza una frecuencia de transmisión de *beacon* igual a 5 Hz, o sea, existe una alta carga de *beaconing*, el mayor valor de razón de entrega de paquetes se logra con el mayor tamaño de ventana de contención, es decir, con 1023. De modo que, cuando en el escenario existe una baja carga de *beaconing*, los valores más elevados de razón de entrega de paquetes se obtienen para un tamaño de ventana de contención igual a 15. Sin embargo, cuando existe en el escenario una alta carga de *beaconing*, los valores más elevados de razón de entrega de paquetes se obtienen con una ventana de contención de 1023, debido a que se produce un menor número de transmisiones concurrentes. Esto evidencia que, en situaciones donde existe una alta carga de *beaconing* en el sistema, es conveniente utilizar el mayor tamaño de ventana de contención, de esta forma se logra una mayor confiabilidad en el sistema.

Para una densidad de nodos de 78 veh/Km² (Dn₁) y menor tamaño de ventana de contención (CW= 3) se alcanza una razón de entrega de paquetes de 95.73 % para una frecuencia de transmisión de 1 Hz y 77.21 % (5Hz), lo que evidencia que un incremento en la frecuencia de transmisión de *beacons* provoca el descenso en la razón de entrega de paquetes. La gráfica de la Figura 3.1 muestra que para la frecuencia de 1 Hz la razón de entrega de paquetes sobrepasa 90 % en cada una de las densidades de nodos, no siendo así con la frecuencia de transmisión de 5 Hz, donde el valor más alto apenas alcanza el 80 % y ocurre para la densidad de nodos más baja (78 veh/Km²) y valores de ventana de contención 7 y 15. Con el aumento de la densidad de nodos a 125 veh/Km² disminuye la razón de entrega de paquetes un 2 % para frecuencia de transmisión de 1 Hz (Dn₂ con respecto a Dn₁) y 8 % para frecuencia de 5 Hz . Para un incremento máximo de 197 veh/Km² ocurre un decrecimiento de un 4 % en la razón de entrega de paquetes (Dn₃ con respecto a Dn₁) para una frecuencia de 1 Hz y un decrecimiento de un 23 % para 5 Hz de frecuencia. Como se muestra, el incremento de la densidad de nodos conduce a una decadencia en la razón de entrega de paquetes con un mayor impacto para el uso de la

frecuencia de 5 Hz. Esto muestra que un aumento en la densidad de nodos, frecuencia de transmisión de *beacons*, y por tanto un aumento en el número de colisiones ocasionan una reducción en la razón de entrega de paquetes.

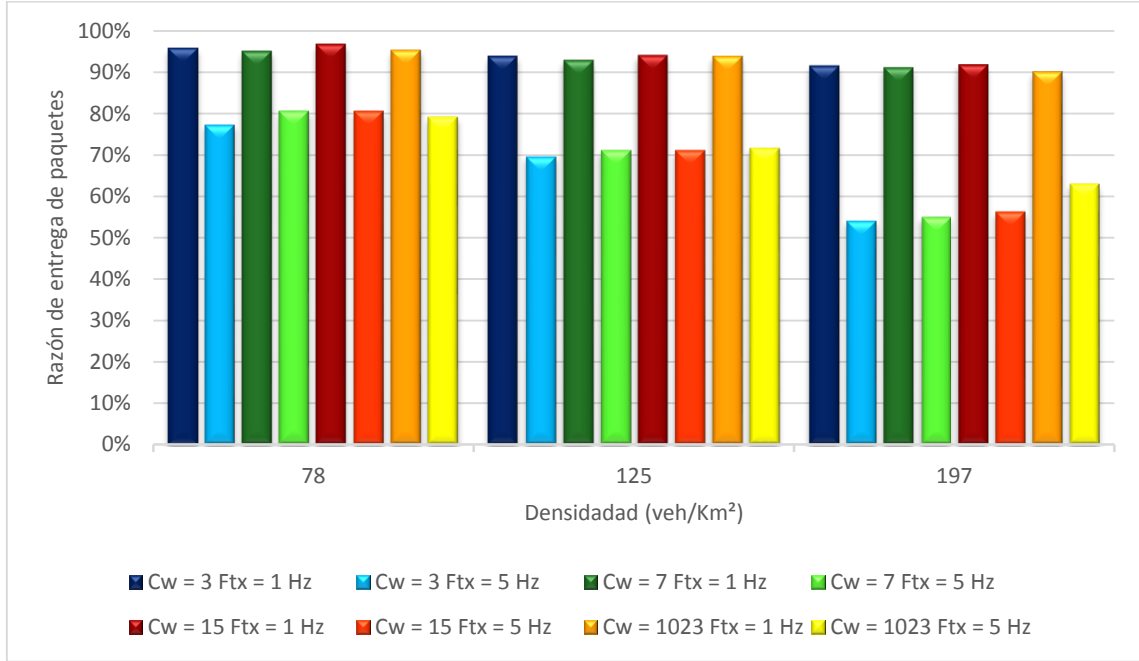


Figura 3.1. Razón de entrega de paquetes en el entorno Urbano Chicago en función de la densidad de nodos.

3.2.3 Error de posición máximo real

La Figura 3.2 muestra el error de posición máximo real en el nodo 6 en función del tiempo de simulación para una densidad de nodos de 125 veh/Km² y frecuencia de transmisión de *beacons* igual a 5 Hz.

Para los cuatro valores de ventana de contención el error de posición se mantiene la mayor parte del tiempo de simulación en 3 m. De aquí se muestra que el incremento en el tamaño de la ventana de contención para una misma densidad de nodos y frecuencia de transmisión no tiene un impacto significativo en el error de posición máximo real. En estas condiciones, considerando solamente el error posición máximo como métrica de desempeño de esta red, se puede decir que para una frecuencia de transmisión de *beacon* baja y media y utilizando los cuatro valores de ventana de contención, el sistema cumple con los requerimientos de exactitud de información de localización necesarios para la correcta operación de las aplicaciones seguridad vial.

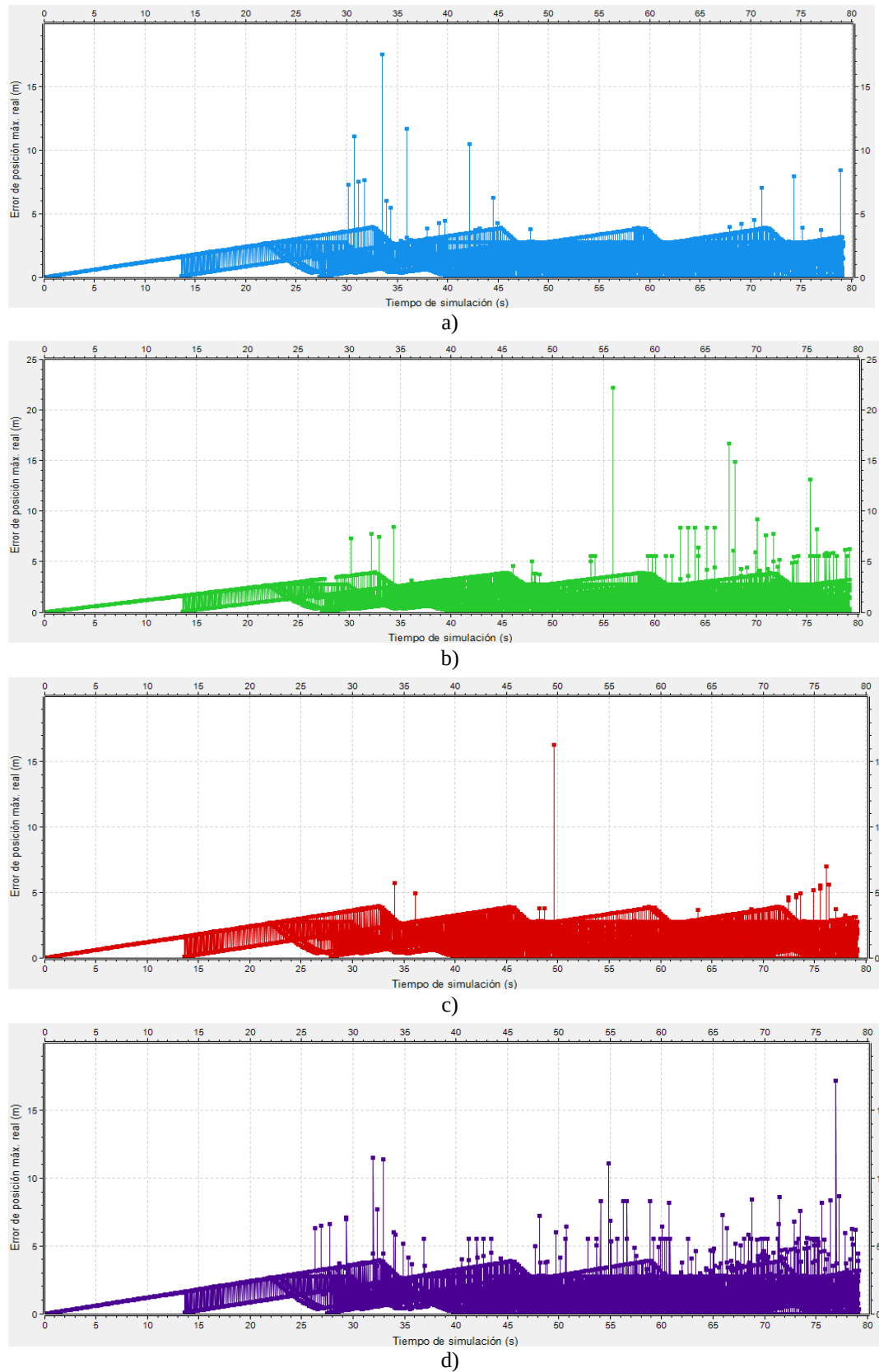


Figura 3.2. Error de posición máximo real en el nodo 6 para 125 veh/Km². en función del tiempo de simulación para el entorno Urbano Chicago a) CW = 3, b) CW = 7, c) CW = 15, d) CW = 1023.

Para un tamaño de ventana de contención igual a 3 ($CW = 3$) el número de veces que el nodo 6 recibe un error de posición mayor a 3 m es 1583, lo que se representa en la Figura 3.2 a) y el mayor incremento en el error de posición no sobrepasa los 18 m. Para un tamaño de ventana de contención igual a 7 ($CW = 7$) el número de veces que ocurre un incremento del error de posición sobre los 3 m es aproximadamente 1457 (Ver Figura 3.2 b)) y el valor más alto del error de posición no sobrepasa los 23 m. Con tamaño de ventana de contención igual a 15 ($CW = 15$) el error de posición incrementa 1689 veces representado en la Figura 3.3 c) y un máximo de error de posición igual a 18 m. Para un tamaño de ventana de contención igual a 1023 ($CW = 1023$), el incremento del error de posición es de 1837 veces, graficado en la Figura 3.2 d).

El gráfico de barras de la Figura 3.3 muestra el número de veces que el error de posición máximo incrementa los 3 m en función del tamaño de la ventana de contención para el entorno Urbano Chicago. El mayor número de incremento del error de posición se obtiene para un tamaño de ventana de contención igual a 1023, y el menor número de incrementos en el error de posición se logra con un tamaño de ventana de contención igual a 7. Se puede decir que para una densidad media de nodos circundantes (125 veh/Km^2) es recomendable usar un tamaño de ventana de contención igual a 7 para lograr la menor cantidad de pérdidas de información durante el proceso de *beaconing*, y cumplir con los requisitos de las aplicaciones de seguridad vial.

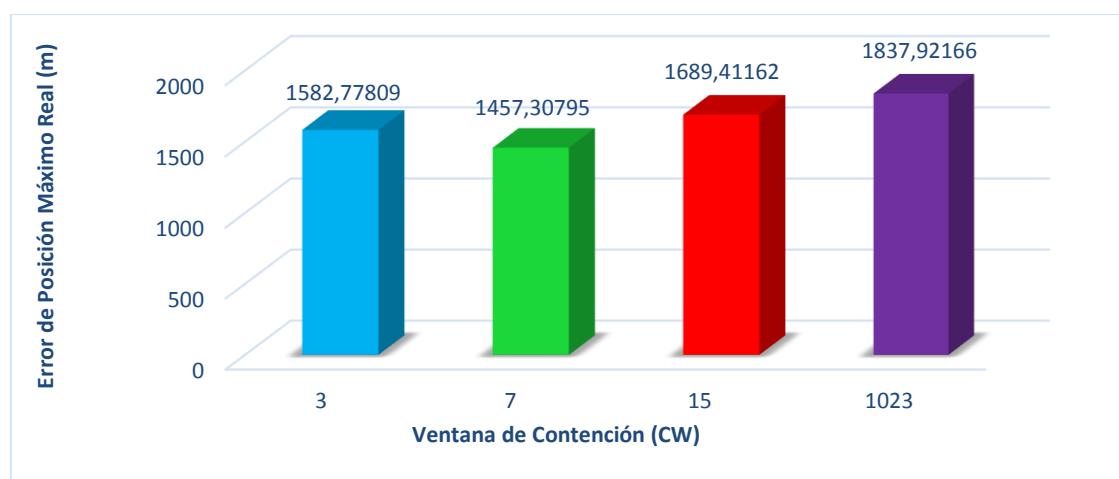
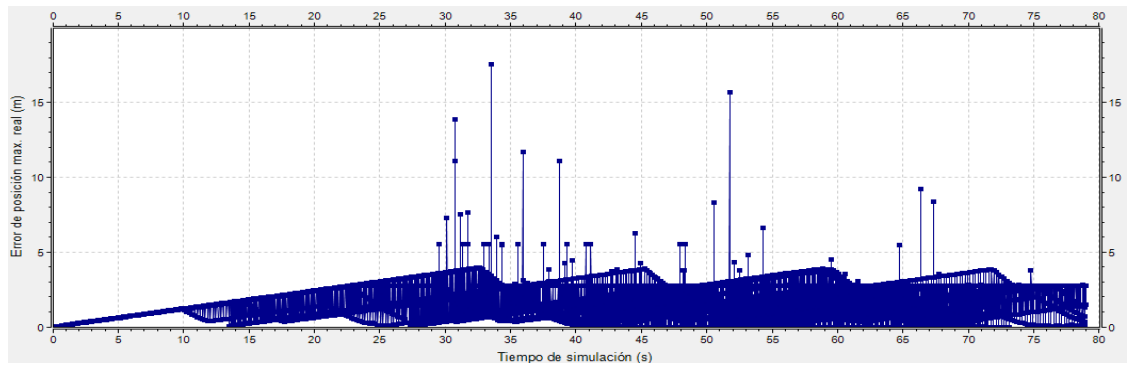


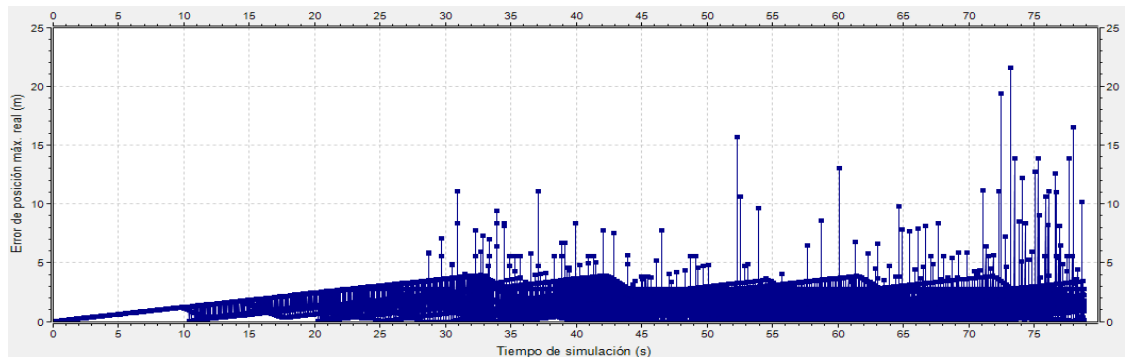
Figura 3.3. Número de veces que el error de posición máximo real sobrepasa los 3 m en función del tamaño de la ventana de contención para el entorno Urbano Chicago.

Los gráficos de la Figura 3.4 reflejan el error de posición máximo real en metros para el nodo 2 en función del tiempo de simulación en segundos para valores de ventana de contención 3 y 1023, densidades de nodos de 78 veh/Km² y 197 veh/Km² y frecuencia de transmisión igual a 5 Hz.

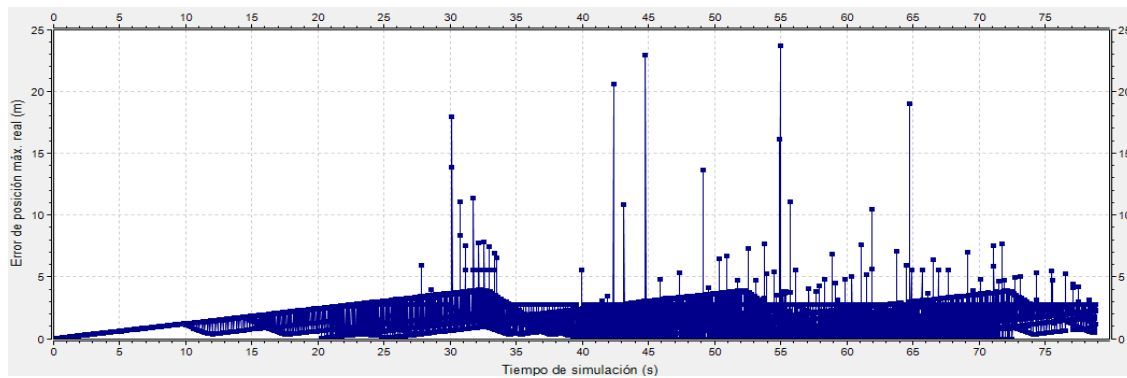
Se muestra que una mayor densidad de nodos en el escenario se traduce a un mayor error de posición máximo para un mismo tamaño de ventana de contención. Se observa que para un tamaño de ventana de contención igual a 3 (Figura 3.4 a) y c)) en ambas densidades el error de posición no sobrepasa los 3 m la mayor parte del tiempo de simulación. Para una densidad de 78 veh/Km² (Dn₁) hay un incremento máximo en el error de posición de 18 m mientras que para 197 veh/Km² (Dn₃) el mayor incremento del error es de 23 m. Con un tamaño de ventana de contención igual a 1023 (Figuras 3.4 b) y d)) se observa un mayor impacto del aumento de la densidad de nodos sobre el error de posición. Para 78 veh/Km² el mayor incremento del error de posición es de 24 m y la mayor parte del tiempo no sobrepasa los 3 m. Con 197 veh/Km² el mayor incremento sobrepasa los 30 m y se mantiene generalmente con 5 m de error de posición. Se puede decir que para un mismo tamaño de ventana de contención el aumento de la densidad de nodos circundantes en el escenario provoca que aumente el error de posición máximo. Esto evidencia que tanto para densidades bajas y altas de nodos es favorable utilizar un tamaño de ventana de contención igual a 3 para cumplir con los requerimientos de exactitud de la información necesarios para un buen desempeño de las aplicaciones de seguridad vial en las redes ad-hoc vehiculares.



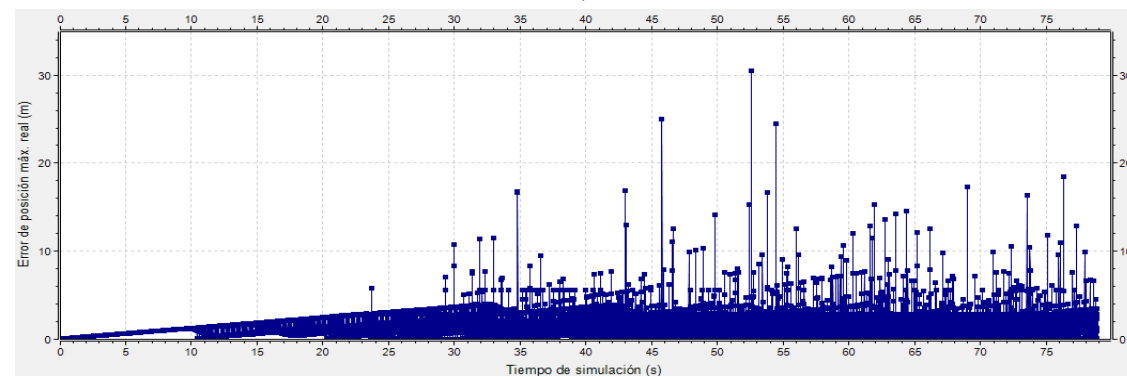
a)



b)



c)



d)

Figura 3.4. Error de posición máximo real en función del tiempo de simulación en el nodo 2 para el entorno Urbano Chicago a) $CW = 3, 78 \text{ veh/Km}^2$. b) $CW = 3, 197 \text{ veh/Km}^2$. c) $CW = 1023, 78 \text{ veh/Km}^2$. d) $CW = 1023, 197 \text{ veh/Km}^2$.

3.3 Resultados obtenidos en el entorno Autopista Chicago

3.3.1 Número de colisiones promedio

La Tabla 3.2 muestra el número de colisiones promedio para el entorno Autopista Chicago en función de las velocidades de los vehículos para diferentes valores de ventana de contención y frecuencias de transmisión de 1 y 5 Hz. Se observa que para un mismo tamaño de ventana de contención y frecuencia de transmisión de *beacons*, el aumento de la velocidad de los nodos conduce una disminución del número de colisiones promedio. Para una misma velocidad y tamaño de ventana de contención, el aumento de la frecuencia de transmisión de *beacons* eleva el número de colisiones promedio.

Tabla 3.2. Número de colisiones promedio para el entorno Autopista Chicago

CW	FTx	Número de colisiones promedio			
		40 Km/h	80 Km/h	120 Km/h	160 Km/h
3	1 Hz	807	766	45	49
3	5 Hz	4739	2780	1202	662
7	1 Hz	847	116	53	45
7	5 Hz	4061	3418	49	679
15	1 Hz	709	127	56	25
15	5 Hz	19112	3135	1022	533
1023	1 Hz	766	127	49	14
1023	5 Hz	19112	2987	1287	653

Para una velocidad de 40 km/h, CW = 3 y frecuencia de transmisión de *beacons* de 1 Hz ocurren 807 colisiones por nodo y para 5 Hz de frecuencia existe un incremento de 3932 colisiones. Para CW= 7 no ocurre gran impacto en el número de colisiones promedio: se observan 40 colisiones más por nodo para frecuencia de 1 Hz y una minoración de 678 colisiones para frecuencia de 5 Hz con respecto a las colisiones para la CW= 3. Sin embargo, para la frecuencia de 5 Hz se observa un incremento en el número de colisiones de 15051 entre los tamaños de ventana de contención 15 y 7. De esto se puede expresar que en este tipo de escenarios no existe comportamiento definido para el número de colisiones con el aumento de la ventana de contención, pero un incremento en la frecuencia de transmisión de *beacons* aumenta el número de colisiones promedio. En estas condiciones

puede ser factible el empleo de pequeños tamaños de ventana de contención para bajas velocidades.

Con un tamaño de ventana de contención igual a 3 y una frecuencia de transmisión de *beacons* de 5 Hz se producen 4739 colisiones promedio para una velocidad de 40 Km/h. Con el incremento de la velocidad a 80 Km/h disminuye el número de colisiones a 2780 colisiones promedio. Este comportamiento se mantiene con el incremento de la velocidad en los vehículos obteniendo 1202 colisiones para 120 Km/h y 662 colisiones par 160 Km/h. Lo que evidencia que el incremento en la velocidad disminuye el número de colisiones en el escenario.

3.3.2 Razón de entrega de paquetes

La Figura 3.5 muestra la razón de entrega de paquetes del entorno Autopista Chicago en función de la velocidad de los vehículos, variando el tamaño de la ventana de contención y utilizando frecuencias de transmisión de *beacons* de 1 y 5 Hz. Se observa que, para un mismo tamaño de ventana de contención, un aumento en la velocidad y frecuencia de transmisión de *beacons* conduce a una mayor razón de entrega de paquetes. Cuando los vehículos se desplazan a una velocidad igual a 40 Km/h, los valores más elevados de razón de entrega de paquetes para una frecuencia de transmisión igual a 1 Hz se obtienen para un tamaño de ventana de contención igual a 15 (CW = 15), mientras que para una frecuencia de transmisión igual a 5 Hz se obtiene para un tamaño de ventana de contención igual a 7. Cuando la velocidad se incrementa hasta 80 Km/h, el valor más elevado de razón de entrega de paquetes para la frecuencia de transmisión de 1 Hz, se obtiene para un tamaño de ventana de contención igual a 15, mientras que, para la frecuencia de 5 Hz, se logra con una ventana de contención igual a 3. Cuando la velocidad aumenta hasta alcanzar los 120 Km/h y se utiliza una frecuencia de transmisión de *beacon* igual a 1 Hz, el mayor valor de razón de entrega de paquetes se logra con el menor tamaño de ventana de contención, es decir, con 3, mientras que para una frecuencia de 5 Hz el mayor valor se obtiene para un tamaño de ventana de contención igual a 7. Para la máxima velocidad desarrollada por los vehículos, es decir 160 Km/h, la mayor razón de entrega de paquetes para 1 Hz de frecuencia se alcanza con los tamaños de ventana de contención iguales a 15 y 1023 y para

5 Hz de frecuencia el mayor valor se obtiene para un tamaño de ventana de contención igual a 15.

De modo que, cuando los nodos se trasladan a velocidades bajas por el escenario, es decir, en el escenario existe una baja carga de *beaconing*, los valores más elevados de razón de entrega de paquetes se obtienen para tamaños de ventana de contención iguales a 7 para 5 Hz de frecuencia y ventana de contención igual a 15 para frecuencia de transmisión igual a 1 Hz. Sin embargo, cuando existe en el escenario una alta carga de *beaconing*, los valores más elevados de razón de entrega de paquetes se obtienen para ventanas de contención de 15 con frecuencia igual a 5 Hz y tamaño de ventana de contención igual a 1023, utilizando frecuencia de transmisión de *beacons* igual a 1 Hz, debido a que se produce un menor número de transmisiones concurrentes. Esto evidencia que, en situaciones donde existe una alta carga de *beaconing* en el sistema, es conveniente utilizar el mayor tamaño de ventana de contención, de esta forma se logra una mayor confiabilidad en el sistema.

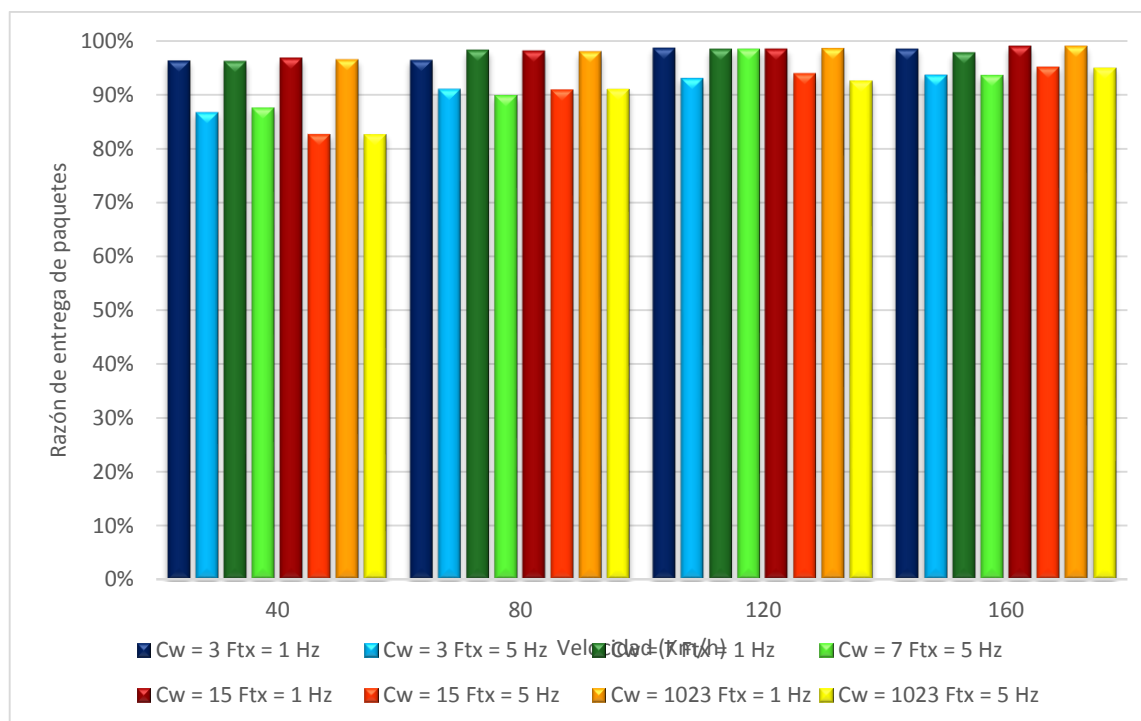


Figura 3.5. Razón de entrega de paquetes en función de la velocidad de los vehículos para el entorno Autopista Chicago

Se observa que el aumento de la velocidad de los vehículos por el escenario no influye de manera significativa sobre la razón de entrega de paquetes. Para cada una de las velocidades la razón de entrega de paquetes sobrepasa el 80 %.

Para la frecuencia de 1 Hz se obtienen los mayores porcentajes de razón de entrega de paquetes, alcanzando un 99 % para 160 Km/h y ventanas de contención 15 y 1023. El resto de los valores de CW sobrepasan el 96 % en cada una de las velocidades. Para 5 Hz el mayor incremento se observa para 120 Km/h y CW = 7 con 98 % de razón de entrega de paquetes.

Para un valor de CW = 3 y frecuencia de transmisión de *beacons* de 1 Hz se obtiene una razón de entrega de paquetes de 96 % para velocidad de 40 Km/h, 96 % (80 Km/h), 98 % (120 Km/h) y 98 % (160 Km/h), lo que evidencia que no hay un impacto significativo en la razón de entrega de paquetes con el aumento de la velocidad de los vehículos. En este contexto, teniendo en cuenta solo la razón de entrega de paquetes como métrica de desempeño se puede decir que el sistema cumple con los requerimientos de envío y recepción de mensajes para el correcto funcionamiento de las aplicaciones de seguridad vial.

El aumento de la ventana de contención para una misma frecuencia de transmisión influye de la siguiente manera: Para una velocidad de 40 Km/h y frecuencia de transmisión de *beacons* de 1Hz se obtiene un 96 % en la razón de entrega de paquetes para CW = 3, 96 % (CW = 7), 97 % (CW = 15) y 96 % (CW = 1023). Para una frecuencia de transmisión igual a 5 Hz y manteniendo la misma velocidad se obtiene un 87 % en la razón de entrega de paquetes para un tamaño de ventana de contención igual a 3 (CW = 3), 88 % (CW = 7), 82 % (CW = 15) y 82 % (CW = 1023). Esto evidencia que no hay un impacto significativo en la razón de entrega de paquetes para un aumento en el tamaño de la ventana de contención.

3.3.3 Error de posición máximo real

En la Figura 3.6 y 3.7 se muestra el error de posición máximo real en metros en función del tiempo de simulación en segundos para cada una de las velocidades configuradas con 1 Hz de frecuencia y tamaños de ventanas de contención 3 y 1023. Las gráficas de este escenario evidencian que una disminución en la frecuencia de transmisión de *beacons*, trae consigo

un aumento del error de posición máximo. No obstante, transmitir a altas frecuencias no garantiza un error de posición pequeño si se producen muchas colisiones y por tanto gran pérdida de la información.

Se observa que en condiciones ideales de comunicación para ambos tamaños de ventana de contención y velocidad de 40 Km/h, el error de posición mantiene la mayor parte del tiempo un valor inferior a los 11 m con un incremento máximo hasta 23 m. Para 80 Km/h y tamaño de ventana de contención igual a 3 ($CW = 3$), el error de posición máximo no supera los 11 m la mayor parte del tiempo de simulación y su valor máximo alcanza los 23 m, pero ocurren más números de incrementos en el error por encima de 11 m en comparación con la velocidad anterior. Sin embargo, al aumentar el tamaño de la ventana de contención con velocidad igual a 80 Km/h se obtienen 22 m en el error de posición durante casi todo el tiempo de simulación y un incremento máximo de 23 m.

Para una velocidad igual a 120 Km/h y en ambos valores de ventana de contención, el error de posición máximo se encuentra la mayor parte del tiempo por encima de los 33 m con incrementos máximos hasta 34 m. Cuando la velocidad experimentada por los vehículos es la máxima configurada para una ventana de contención igual a 3 el error de posición máximo se mantiene igual que para 120 Km/h, no siendo así para un tamaño de ventana de contención igual a 1023 que el error de posición alcanza los 43 m la mayor parte del tiempo y un incremento máximo de 44.

Esto se traduce a que el aumento de la velocidad de los vehículos aumenta el error de posición máximo real haciendo que se dificulte la exactitud de la información de localización de los vehículos circundantes.

Para el correcto funcionamiento de las aplicaciones descentralizadas de conocimiento cooperativo debe existir una relación de compromiso entre la razón de entrega de paquetes y el error de posición máximo real. El valor óptimo del error de posición máximo real está determinado por la aplicación en cuestión, mientras que la razón de entrega de paquetes debe ser lo más alta posible para lograr un elevado grado de confiabilidad en la comunicación.

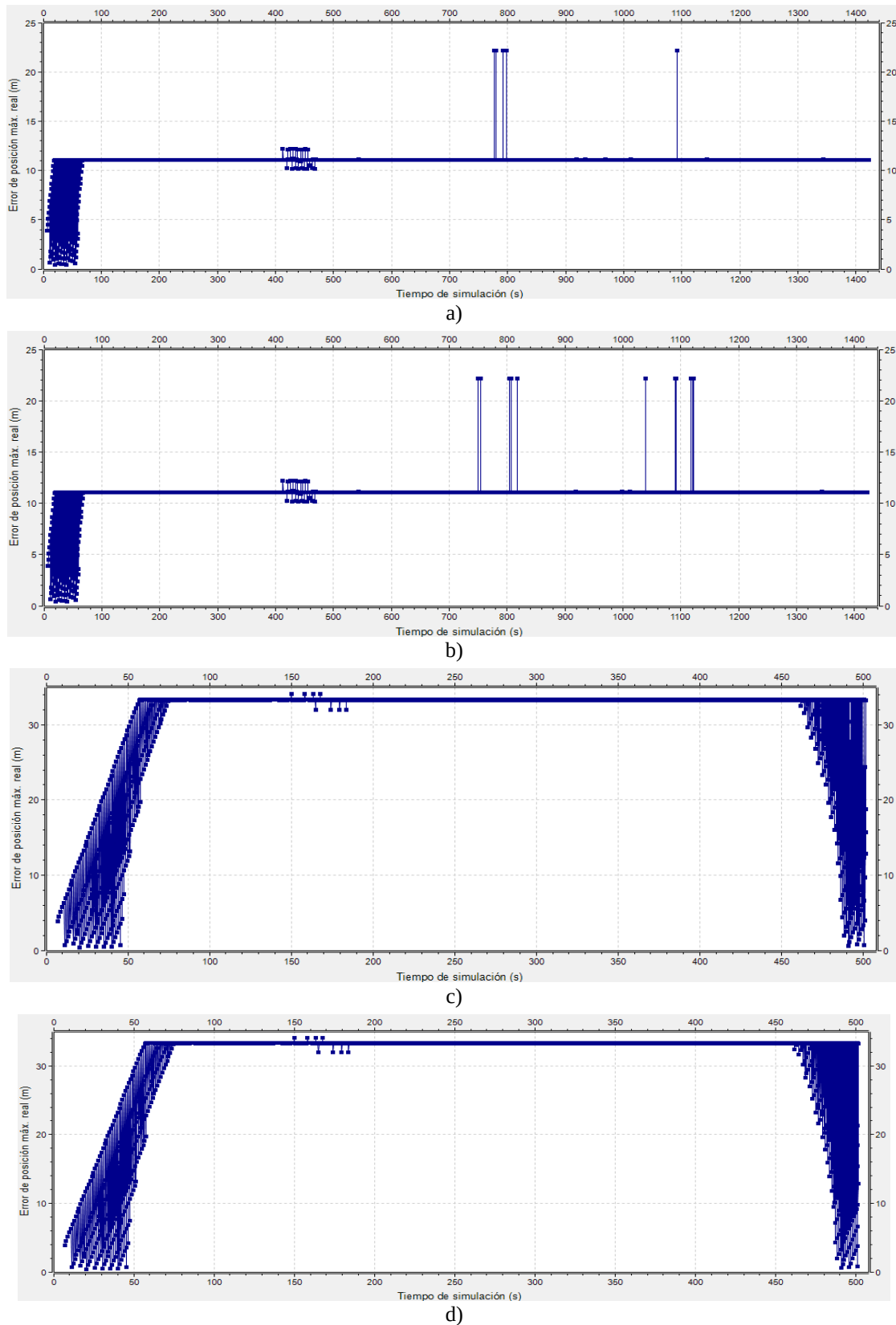


Figura 3.6. Error de posición máximo real en el nodo 2 del entorno Autopista Chicago en función del tiempo de simulación y $CW = 3$. a) 40 Km/h b) 80 Km/h. c) 120 Km/h. d) 160 Km/h.

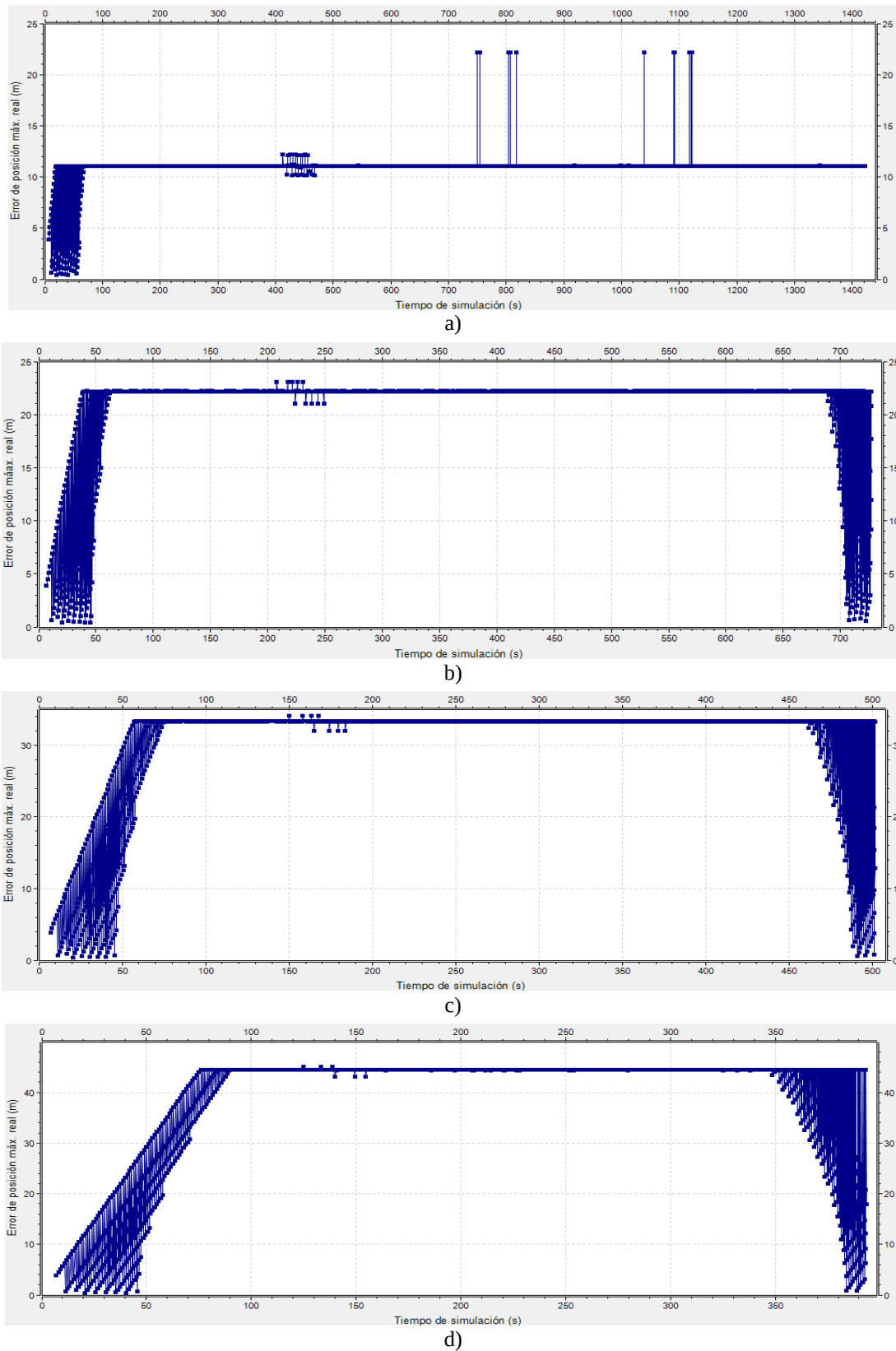


Figura 3.7. Error de posición máximo real en el nodo 2, en función del tiempo de simulación para CW = 1023 en el entorno Autopista Chicago. a) 40Km/h b) 80Km/h. c) 120Km/h. d) 160Km/h..

3.4 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se hace un análisis de los resultados obtenidos y su comportamiento en cada uno de los escenarios configurados.

En el entorno Urbano Chicago las simulaciones evidencian que el aumento de la densidad de nodos y la frecuencia de transmisión de *beacons* provocan el incremento del número de colisiones promedio y la razón de pérdida de paquetes, afectando la calidad de la información que se difunde por el escenario. Con una baja densidad de nodos es recomendable usar un tamaño de ventana de contención igual a 15 y frecuencia de transmisión de 1 Hz para obtener el menor número de colisiones promedio. En situaciones de alta densidad de nodos es recomendable utilizar una ventana con tamaño igual a 1023 y frecuencia de transmisión de 5 Hz. Los valores más altos de la razón de entrega de paquetes se alcanzan con los tamaños de ventana de contención igual a 15 para 1 Hz de frecuencia y 1023 para frecuencia igual a 5 Hz.

En el entorno Autopista Chicago el aumento en la velocidad provoca una disminución de número de colisiones promedio y en la razón de pérdida de paquetes. Para bajas velocidades el menor número de colisiones se alcanza para un tamaño de ventana de contención igual a 15 y frecuencia de transmisión igual a 1 Hz. Para altas velocidades el menor número de colisiones se logra utilizando un tamaño de ventana de contención igual a 1023 con frecuencia de transmisión igual a 1 Hz. Los valores más altos de la razón de entrega de paquetes para bajas velocidades se alcanzan con un tamaño de ventana de contención igual a 15 para frecuencia igual a 1 Hz y 7 para frecuencia igual a 5 Hz. A altas velocidades la mayor razón de entrega de paquetes para ambas frecuencias se alcanza con el uso de un tamaño de ventana de contención igual a 15.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

En este trabajo se estudió el impacto del tamaño de la ventana de contención del protocolo IEEE 802.11p sobre el desempeño de las redes ad-hoc vehiculares. Las simulaciones se realizaron en un entorno urbano y de autopista definidos por una porción de mapa real de la ciudad de Chicago, haciendo uso del simulador de comunicaciones vehiculares VeINS. El desarrollo del trabajo permitió llegar a las siguientes conclusiones:

1. IEEE 802.11p es el estándar definido para la capa MAC y PHY de las arquitecturas de red de los futuros sistemas de transporte inteligente. Este protocolo constituye una evolución del popular estándar IEEE 802.11a diseñado especialmente para las comunicaciones de datos en entornos vehiculares.
2. Los experimentos se desarrollaron con la herramienta de simulación VeINS, que integra el simulador de red OMNeT++ y el simulador de tráfico vehicular SUMO, debido a que es un simulador realista que contiene una implementación reciente del protocolo IEEE 802.11p.
3. Los resultados de los experimentos en el entorno urbano mostraron que para un mismo tamaño de ventana de contención y frecuencia de transmisión de *beacons*, el aumento de la densidad de nodos conduce a un mayor número de colisiones promedio y razón de pérdida de paquetes.
4. Cuando en el entorno urbano existió una baja carga de *beaconing*, los valores más elevados de razón de entrega de paquetes se obtuvieron para un tamaño de ventana de contención igual a 15. Sin embargo, cuando existió en el escenario una alta carga de *beaconing*, los valores más altos de razón de entrega de paquetes se alcanzaron con una ventana de contención de 1023. Esto evidencia que, en situaciones donde

existe una alta carga de *beaconing* en el sistema, es conveniente utilizar un gran tamaño de ventana de contención, de esta forma se logra una mayor confiabilidad en el sistema.

5. El aumento de la velocidad promedio de los vehículos en el entorno de autopista, elevó la razón de entrega de paquetes independientemente del tamaño de la ventana de contención y de la frecuencia de transmisión de *beacon*.
6. El aumento de la velocidad de los vehículos disminuyó el número de colisiones promedio y la razón de pérdida de paquetes. Para bajas velocidades, el mejor desempeño del sistema se obtuvo con los valores más bajos de ventana de contención, mientras que para velocidades altas el mejor desempeño se logró con los valores más elevados de ventana de contención.

Recomendaciones

Para dar continuidad a este tema de investigación se propone la recomendación siguiente:

Estudiar mecanismos de ajuste dinámico del tamaño de la ventana de contención de IEEE 802.11p para mejorar el desempeño de las comunicaciones vehiculares.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. U. de P. de Datos, «Comunicaciones Privadas en Redes Ad-hoc Vehiculares Alexandre Viejo, Francesc Sebé, Josep Domingo-Ferrer y Jesus Manjón».
- [2] I. S. Association y others, «802.11 p-2010—ieee standard for information technology—local and metropolitan area networks—specific requirements—part 11: Wireless lan medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications amendment 6: Wireless access in vehicular environments», *URL Httpstandards Ieee Orgfindstdsstandard80211 P-2010 Html*.
- [3] R. Reinders, M. Van Eenennaam, G. Karagiannis, y G. Heijenk, «Contention window analysis for beaconing in VANETs», en *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2011 7th International*, 2011, pp. 1481–1487.
- [4] M. Á. Rodríguez García, «Evaluación de Propuestas de Servicios de Localización para Redes VANET», 2011.
- [5] A. M. Orozco, G. Llano, y R. Michoud, «Redes vehiculares Ad-hoc: aplicaciones basadas en simulación», *Ingenium*, vol. 6, n.º 12, pp. 11–22, 2012.
- [6] H. Doumenc, «Estudios comparativo de protocolos de encaminamiento en redes VANET», 2008.
- [7] J. Moreno y J. Herrera, «Diseño e Implementación de un Dispositivo que Soporta la Comunicación entre Vehículos Conectados vía una VANET», 2015.
- [8] M. A. Torres Giraldo, «Estudio y simulación de redes AD-HOC Vehiculares Vanets», 2013.
- [9] V. E. M. N. Maldonado Narváez, «Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad para Redes Ad-Hoc Vehiculares». 2012.
- [10] G. Samara, W. A. Al-Salihy, y R. Sures, «Security analysis of vehicular ad hoc networks (VANET)», en *Network Applications Protocols and Services (NETAPPS), 2010 Second International Conference on*, 2010, pp. 55–60.
- [11] R. S. Raw, M. Kumar, y N. Singh, «Security challenges, issues and their solutions for VANET», *Int. J. Netw. Secur. Its Appl.*, vol. 5, n.º 5, p. 95, 2013.
- [12] J. E. Naranjo, F. Jiménez, J. M. Armingol, y A. de la Escalera, «Entornos inteligentes basados en redes inalámbricas: aplicaciones al transporte, automóvil inteligente/conectado y seguridad vial», *Univ. Politécnica Madr. Pág.*, vol. 38, 2008.

- [13] I. S. Association y others, «802.11 p-2010—ieee standard for information technology—local and metropolitan area networks—specific requirements—part 11: Wireless lan medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications amendment 6: Wireless access in vehicular environments», URL *Httpstandards Ieee Orgfindstdsstandard80211 P-2010 Html*.
- [14] J. Gabarron, E. Lopez, y J. Haro, «Evaluacion de mecanismos de priorizacion en 802.11 p con VHDL», *VII Jornadad Ing. Telemat.*, pp. 190–196.
- [15] A. Jafari, S. Al-Khayatt, y A. Dogman, «Performance Evaluation of IEEE 802.11 p for Vehicular Communication Networks», PhD Dissertation, Faculty of Arts, Computing, Engineering, and Sciences, Postgraduate Program, Sheffield Hallam University, South Yorkshire, England, UK, 2011.
- [16] D. Eckhoff y C. Sommer, «A multi-channel IEEE 1609.4 and 802.11 p EDCA model for the veins framework», en *Proceedings of 5th ACM/ICST International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems: 5th ACM/ICST International Workshop on OMNeT++*. (Desenzano, Italy, 19-23 March, 2012). *OMNeT*, 2012.
- [17] J. Mišić, G. Badawy, y V. B. Mišić, «Performance characterization for IEEE 802.11 p network with single channel devices», *Veh. Technol. IEEE Trans. On*, vol. 60, n.º 4, pp. 1775–1787, 2011.
- [18] B. Guguich Perdomo, D. López Colombo, y F. Avas Bergeret, «Vo! zila: Comunicación inter-vehicular», 2010.
- [19] K. Z. Ghafoor, J. Lloret, K. A. Bakar, A. S. Sadiq, y S. A. B. Mussa, «Beaconing approaches in vehicular ad hoc networks: a survey», *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 73, n.º 3, pp. 885–912, 2013.
- [20] R. K. Schmidt, T. Leinmüller, E. Schoch, F. Kargl, y G. Schäfer, «Exploration of adaptive beaconing for efficient intervehicle safety communication», *Netw. IEEE*, vol. 24, n.º 1, pp. 14–19, 2010.
- [21] M. Raya, P. Papadimitratos, y J.-P. Hubaux, «Securing vehicular communications», *IEEE Wirel. Commun. Mag. Spec. Issue Inter-Veh. Commun.*, vol. 13, n.º LCA-ARTICLE-2006-015, pp. 8–15, 2006.
- [22] T. Leinmüller, A. Held, G. Schäfer, y A. Wolisz, «Intrusion detection in VANETs», en *In proceedings of 12th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP 2004) Student Poster Session*, 2004.
- [23] S. A. Mohammad, A. Rasheed, y A. Qayyum, «VANET architectures and protocol stacks: a survey», en *Communication technologies for vehicles*, Springer, 2011, pp. 95–105.
- [24] J. Canales Pallares y others, «Redes Ad Hoc entre vehículos», 2008.
- [25] A. Casabo Gomi, «Diseño de un sistema de comunicaciones V2R», 2010.
- [26] C. Sommer, Z. Yao, R. German, y F. Dressler, «Simulating the influence of IVC on road traffic using bidirectionally coupled simulators», en *INFOCOM Workshops 2008, IEEE*, 2008, pp. 1–6.

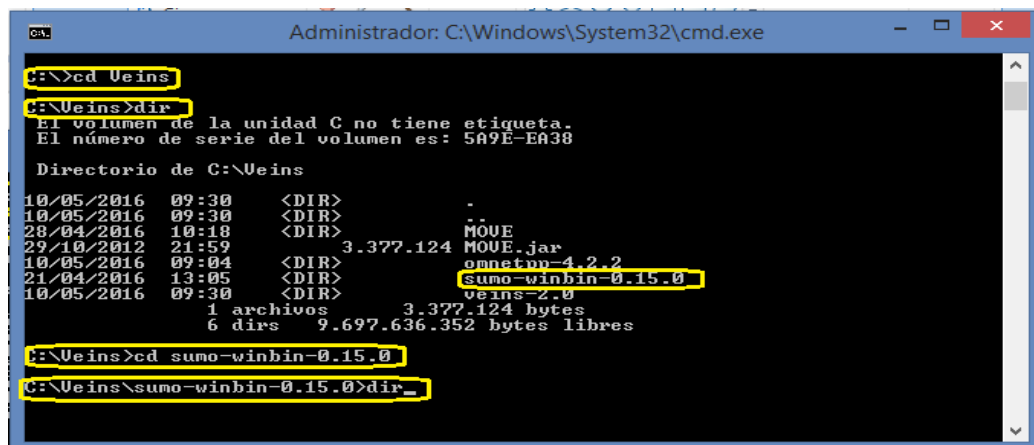
- [27] Ó. A. Orozco, D. F. Chavarro, y Ó. J. Calderón, «Impacto de la velocidad y modelo de movilidad en una comunicación de datos de una red vehicular», *Entre Cienc. E Ing.*, n.º 15, 2014.
- [28] M. Fiore, J. Harri, F. Filali, y C. Bonnet, «Vehicular mobility simulation for VANETs», en *Simulation Symposium, 2007. ANSS'07. 40th Annual*, 2007, pp. 301–309.
- [29] C. Sommer, Z. Yao, R. German, y F. Dressler, «On the need for bidirectional coupling of road traffic microsimulation and network simulation», en *Proceedings of the 1st ACM SIGMOBILE workshop on Mobility models*, 2008, pp. 41–48.
- [30] D. Krajzewicz, G. Hertkorn, C. Rössel, y P. Wagner, «SUMO (Simulation of Urban MObility)-an open-source traffic simulation», en *Proceedings of the 4th Middle East Symposium on Simulation and Modelling (MESM20002)*, 2002, pp. 183–187.
- [31] R. M. Hernández, J. G. Haro, y E. E. López, «Evaluación de herramientas de simulación de redes vehiculares», *Jorn. Introd. Investig. UPCT*, n.º 4, pp. 109–111, 2011.
- [32] P. González-Ripoll Cerezo, «Estudio del simulador de redes vehiculares veins», 2012.
- [33] M. Behrisch, L. Bieker, J. Erdmann, y D. Krajzewicz, «Sumo–simulation of urban mobility», en *The Third International Conference on Advances in System Simulation (SIMUL 2011)*, Barcelona, Spain, 2011.
- [34] R. Santos Leiva, «Simulación de VANETS (Vehicular Ad-Hoc Networks)», 2007.
- [35] R. Murcia Hernández y others, «Evaluación de herramientas de simulación de Redes Vehiculares», 2010.
- [36] A. Cruz y J. David, «Estudio y simulacion de una red AD-HOC vehicular VANET», 2009.
- [37] A. Varga y R. Hornig, «An overview of the OMNeT++ simulation environment», en *Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops*, 2008, p. 60.
- [38] R. Limia Jurado y A. Miguel Hernández, «Estudio del uso del simulador OMNeT++ para la evaluación de escenarios celulares y multisalto con WLAN», 2011.
- [39] D. B. Cruz Herrera, «Evaluación de redes de sensores inalámbricos mediante el Simulador OMNeT++», 2014.
- [40] S. Bolufé Aguila y S. Montejo Sánchez, «Difusión Periódica de Información de Estado usando los Protocolos IEEE 1609.4/802.11p en VANETs», 2015.

ANEXOS

Anexo I Conversión del archivo *.osm en extensiones *.net.xml y *.poi.xml

La conversión del archivo *.osm exportado del sitio Openstreetmap para la posterior utilización de la herramienta MOVE se realiza con los siguientes pasos:

- ❖ Copiar los archivos tipemap y *.osm para la carpeta bin de SUMO dentro del directorio C.
- ❖ Ejecutar Windows r/cmd y escribir el comando dir para ver el contenido del directorio C.
- ❖ Acceder al directorio C:\Veins\sumo-winbin-0.15.0\sumo-0.15.0\bin como se muestra en la Figura A1 a) y b).
- ❖ Ejecutar los comandos netconvert y policonvert para para la conversión del archivo. Figura A1 c).
- ❖ Realizar el mismo proceso para ambos escenarios.



```
Administrador: C:\Windows\System32\cmd.exe

C:\>cd Veins
C:\Veins>dir
El volumen de la unidad C no tiene etiqueta.
El número de serie del volumen es: 5A9E-EA38

Directorio de C:\Veins
10/05/2016  09:30    <DIR>          .
10/05/2016  09:30    <DIR>          ..
28/04/2016  10:18    <DIR>          MOVE
29/10/2012  21:59             3.377.124 MOVE.jar
10/05/2016  09:04    <DIR>          omnetpp-4.2.2
21/04/2016  13:05    <DIR>          sumo-winbin-0.15.0
10/05/2016  09:30    <DIR>          veins-2.0
               1 archivos          3.377.124 bytes
               6 dirs          9.697.636.352 bytes libres

C:\Veins>cd sumo-winbin-0.15.0
C:\Veins\sumo-winbin-0.15.0>dir
```

a)

```

C:\Veins\sumo-winbin-0.15.0>dir
El volumen de la unidad C no tiene etiqueta.
El número de serie del volumen es: 5A9E-EA38

Directorio de C:\Veins\sumo-winbin-0.15.0

21/04/2016  13:05    <DIR>          -
21/04/2016  13:05    <DIR>          -
13/03/2012  22:07    <DIR>          sumo-0.15.0
               0 archivos             0 bytes
               3 dirs      9.695.899.648 bytes libres

C:\Veins\sumo-winbin-0.15.0>cd sumo-0.15.0
C:\Veins\sumo-winbin-0.15.0\sumo-0.15.0>dir
El volumen de la unidad C no tiene etiqueta.
El número de serie del volumen es: 5A9E-EA38

Directorio de C:\Veins\sumo-winbin-0.15.0\sumo-0.15.0

13/03/2012  22:07    <DIR>          -
13/03/2012  22:07    <DIR>          -
07/06/2016  09:10    <DIR>          bin
13/03/2012  22:07    <DIR>          35.145 corring
13/03/2012  22:07    <DIR>          docs
13/03/2012  22:07    <DIR>          2.818 README
21/04/2016  13:05    <DIR>          tools
               2 archivos             37.963 bytes
               5 dirs      9.695.899.648 bytes libres

C:\Veins\sumo-winbin-0.15.0\sumo-0.15.0>cd bin

```

b)

```

C:\Veins\sumo-winbin-0.15.0\sumo-0.15.0\bin>
C:\Veins\sumo-winbin-0.15.0\sumo-0.15.0\bin>cd ChicagoCity
C:\Veins\sumo-winbin-0.15.0\sumo-0.15.0\bin\ChicagoCity>cd ..
C:\Veins\sumo-winbin-0.15.0\sumo-0.15.0\bin>netconvert.exe --osm-files urbanochi
cago.osm -o urbanochicago.net.xml
Success.
C:\Veins\sumo-winbin-0.15.0\sumo-0.15.0\bin>polyconvert.exe --net-file urbanochi
cago.net.xml --osm-files urbanochicago.osm --type-file typemap.xml -o urbanochi
cago.poi.xml
Success.
C:\Veins\sumo-winbin-0.15.0\sumo-0.15.0\bin>_

```

c)

Figura A1. Conversión del archivo *.osm.