



Impacto de la densidad vehicular en los parámetros de transmisión de datos en una red de comunicación v2v para entornos urbanos bajo el estándar IEEE 802.11p

Chulde Almeida, Glenn Israel

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica Y Telecomunicaciones

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y
Telecomunicaciones

Ing. Granda Gutiérrez, Fausto Lenin

7 de enero de 2021



Document Information

Analyzed document	Glenn_Chulde_TESIS_2020(dic23).pdf (D90852314)
Submitted	1/4/2021 1:59:00 AM
Submitted by	Granda Gutiérrez Fausto Lenin
Submitter email	flgranda@espe.edu.ec
Similarity	3%
Analysis address	flgranda.espe@analysis.arkund.com

Sources included in the report

SA	Trabajo de Titulacion danny_11.docx Document Trabajo de Titulacion danny_11.docx (D40644932)	 11
W	URL: https://docplayer.es/79991605-La-version-digital-de-esta-tesis-esta-prottegida-por- ... Fetched: 7/14/2020 3:51:22 PM	 13
SA	TESIS_802.11vsLTE_ViscainoJuanT_V2.docx Document TESIS_802.11vsLTE_ViscainoJuanT_V2.docx (D35171499)	 1
W	URL: https://docplayer.es/7204402-Universidad-tecnica-particular-de-loja-la-universidad ... Fetched: 8/5/2020 6:28:25 AM	 4
W	URL: http://saber.ucv.ve/bitstream/123456789/9331/1/Tesis%20Acosta-Hern%C3%A1ndez.pdf Fetched: 11/22/2020 8:24:01 AM	 1
W	URL: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/4485/santos.pdf Fetched: 10/19/2019 11:58:58 PM	 6

Ing. Fausto Granda Gutiérrez



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“Impacto de la densidad vehicular en los parámetros de transmisión de datos en una red de comunicación v2v para entornos urbanos bajo el estándar IEEE 802.11p”** fue realizado por el señor **Chulde Almeida, Glenn Israel**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 4 de enero de 2021

.....
Ing. Granda Gutiérrez, Fausto Lenin

C. C: 1103416903



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Chulde Almeida, Glenn Israel**, con cédula de ciudadanía n°1725013567, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Impacto de la densidad vehicular en los parámetros de transmisión de datos en una red de comunicación v2v para entornos urbanos bajo el estándar IEEE 802.11p”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 4 de enero de 2021

Chulde Almeida, Glenn Israel

C.C.: 1725013567



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo **Chulde Almeida, Glenn Israel**, con cédula de ciudadanía n°1725013567, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Impacto de la densidad vehicular en los parámetros de transmisión de datos en una red de comunicación v2v para entornos urbanos bajo el estándar IEEE 802.11p”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 4 de enero de 2021

Chulde Almeida, Glenn Israel

C.C.: 1725013567

Dedicatoria

A Dios y la Virgen María, por guiar mi camino, mis acciones, mi forma de ser y por darme la vida y la salud para permitirme lograr este objetivo. A toda mi familia, en especial a mi madre y mi hermana, Pamela y Nardy, por todo el apoyo, esfuerzo, paciencia, dedicación y amor que han invertido en mí para sacarme adelante y enseñarme a ser una gran persona, por guiarme y estar siempre pendientes de mis actos a lo largo de mi vida. A todas aquellas personas que estuvieron conmigo siempre, que me apoyaron y respaldaron en los momentos difíciles, y de las cuales he aprendido muchas cosas valiosas que han marcado momentos inolvidables en mi vida, ustedes saben quiénes son, y esto va también para ustedes.

Agradecimiento

A Dios y a la Virgen María por otorgarme el regalo de la vida, por ponerme en este mundo para dejar una huella. Que sepan que, con trabajo y perseverancia, se puede lograr un objetivo, una meta.

Agradezco a mi madre, por su sacrificio diario por darme la oportunidad de estudiar, por darme su confianza y el ejemplo de perseverancia a base del trabajo. A toda mi familia por creer en mí, por valorar el esfuerzo realizado y por estar siempre pendientes del desarrollo de mi proyecto de tesis.

A mi hermana que con su paciencia, amor y ejemplo de madre supo comprenderme, apoyarme, y presionarme todos los días a desarrollar y culminar este proyecto de tesis de la mejor manera.

A mis tíos, por su apoyo en los momentos más cruciales de mi vida y por estar ahí siempre cuando los necesité.

A mi tutor, Ing. Fusto Granda, por confiar ciegamente en mí, tomando en cuenta que jamás fui su alumno; por brindarme su tiempo a pesar de la gran cantidad de trabajo que tiene dentro de la facultad y su paciencia en guiarme para solucionar los problemas que se me presentaron durante este trabajo final.

Gracias a todos de corazón.

Índice de Contenidos

Urkund	2
Certificación	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Índice de Contenidos	8
Índice de Tablas	11
Índice de Figuras	13
Resumen	16
Abstract.....	17
Capítulo I.....	18
Planteamiento del Problema de Investigación.....	18
Antecedentes	18
Justificación e Importancia	20
Alcance.....	22
Objetivos	23
Objetivo General	23
Objetivos Específicos	23
Descripción General del Trabajo	23
Capítulo II.....	25
Conceptos y Generalidades.....	25

	9
Estado del Arte	25
Marco Teórico Referencial	31
Red Ad Hoc	31
Vehicular Ad Hoc Network (VANET)	31
Propiedades VANET	33
Aplicaciones VANET	35
Arquitectura VANET	37
Comunicación VANET	39
IEEE 802.11p	43
Protocolos de Enrutamiento	48
Modelos de Propagación	53
Modelos de Movilidad	60
Topología de la Red	69
Softwares VANET	71
Capítulo III	77
Marco Metodológico	77
Determinación y Descripción de la Zona Geográfica	78
Densidad de Tráfico Vehicular	79
Software de Simulación	81
Simulador de Tráfico	81
Simulador de Red	83
Simulador Híbrido	86
Modelo de Movilidad	87

	10
Modelo Sintético	87
Modelos Generador de Tráfico Vehicular	88
Modelo de Propagación	88
Protocolo de Enrutamiento	89
Parámetros a Evaluar	89
Throughput.....	89
Packet Delivery Ratio	90
Average End to End Delay.....	91
Jitter	91
Interacción e Integración de los Softwares	92
Capítulo IV.....	103
Pruebas y Resultados	103
Parámetros de Simulación.....	103
Evaluación y Análisis de Desempeño.....	104
Simulación del Escenario 1	104
Simulación del Escenario 2	109
Simulación del Escenario 3	115
Comparación y Análisis de los Casos Simulados en Cada Escenario	120
Capítulo V.....	128
Conclusiones y Trabajos Futuros.....	128
Bibliografía	132

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Comparación de los parámetros técnicos entre MANET y VANET</i>	32
Tabla 2 <i>Comparación de los protocolos UDP y TCP.</i>	41
Tabla 3 <i>Asignación de puertos.</i>	43
Tabla 4 <i>Especificaciones de la serie estándar WLAN IEEE 802.11</i>	44
Tabla 5 <i>Definición de la densidad de tráfico vehicular</i>	80
Tabla 6 <i>Comparación entre los diferentes simuladores de movilidad vehicular.</i>	82
Tabla 7 <i>Comparación de los simuladores de red.</i>	84
Tabla 8 <i>Características de los simuladores híbridos.</i>	86
Tabla 9 <i>Características de los modelos de movilidad sintéticos.</i>	87
Tabla 10 <i>Características de los modelos de movilidad basados en un generador de tráfico vehicular.</i>	88
Tabla 11 <i>Comparación de los protocolos de enrutamiento.</i>	89
Tabla 12 <i>Parámetros de simulación.</i>	103
Tabla 13 <i>Parámetros de transmisión para el escenario de baja densidad: caso 1.</i>	105
Tabla 14 <i>Parámetros de transmisión para el escenario de baja densidad: caso 2.</i>	107
Tabla 15 <i>Parámetros de transmisión para el escenario de baja densidad: caso 3.</i>	108
Tabla 16 <i>Parámetros de transmisión para el escenario de baja densidad: caso 4.</i>	109
Tabla 17 <i>Parámetros de transmisión para el escenario de media densidad: caso 1.</i>	111
Tabla 18 <i>Parámetros de transmisión para el escenario de media densidad: caso 2.</i>	112
Tabla 19 <i>Parámetros de transmisión para el escenario de media densidad: caso 3.</i>	113
Tabla 20 <i>Parámetros de transmisión para el escenario de media densidad: caso 4.</i>	114
Tabla 21 <i>Datos de los parámetros de transmisión del escenario 3: caso 1.</i>	116

Tabla 22 <i>Datos de los parámetros de transmisión del escenario 3: caso 2.</i>	117
Tabla 23 <i>Datos de los parámetros de transmisión del escenario 3: caso 3.</i>	118
Tabla 24 <i>Datos de los parámetros de transmisión del escenario 3: caso 4.</i>	119
Tabla 25 <i>Datos promedios de los parámetros de transmisión para los casos 1: baja y alta densidad.</i>	120
Tabla 26 <i>Datos promedios de los parámetros de transmisión para los casos 2: baja, media y alta densidad.</i>	122
Tabla 27 <i>Datos promedios de los parámetros de transmisión para los casos 3: baja y alta densidad.</i>	124
Tabla 28 <i>Datos promedios de los parámetros de transmisión para los casos 4: baja y alta densidad.</i>	125

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Arquitectura de referencia C2C-CC para redes vehiculares.</i>	37
Figura 2 <i>Entorno VANET.</i>	40
Figura 3 <i>Formato del segmento TCP (a) y del datagrama UDP (b).</i>	42
Figura 4 <i>Distribución del espectro DSRC.</i>	45
Figura 5 <i>Pila de protocolos WAVE para VANET.</i>	47
Figura 6 <i>Protocolos de enrutamiento ad hoc.</i>	49
Figura 7 <i>Efectos de propagación a gran y pequeña escala.</i>	54
Figura 8 <i>Distribución del desvanecimiento a pequeña escala: (a) Rician (b) Rayleigh.</i>	59
Figura 9 <i>Topologías de red.</i>	70
Figura 10 <i>Estructura del software para una simulación VANET.</i>	72
Figura 11 <i>Esquema básico de un generador de tráfico para VANET.</i>	73
Figura 12 <i>Esquema básico de un simulador de red para el entorno VANET.</i>	74
Figura 13 <i>Diagrama del proceso de simulación.</i>	77
Figura 14 <i>Escenario urbano: vista real desde Google Maps.</i>	78
Figura 15 <i>Esquema urbano: vista esquemática 2D.</i>	79
Figura 16 <i>Arquitectura NS2.</i>	85
Figura 17 <i>Esquema de la integración de los simuladores.</i>	92
Figura 18 <i>Mapa de la Plaza Góngora descargado de OSM y modelado en JOSM.</i>	93
Figura 19 <i>Pantalla principal de MOVE.</i>	94
Figura 20 <i>Selección de la opción Flow en MOVE.</i>	95
Figura 21 <i>Configuración del flujo vehicular.</i>	96
Figura 22 <i>Selección de la opción Turn en MOVE.</i>	96

Figura 23 Configuración de la probabilidad de giro.....	97
Figura 24 Selección de la opción Create Vehicle en MOVE.	98
Figura 25 Generador automático de rutas.	98
Figura 26 Selección de la opción Configuration en MOVE.	99
Figura 27 Configuración del simulador de tráfico.....	99
Figura 28 Simulación del modelo de movilidad en SUMO.	100
Figura 29 Generador del tráfico de red.	100
Figura 30 Diagrama de flujo para la generación de tráfico de red.	101
Figura 31 Simulación del tráfico de red en NS-2.....	102
Figura 32 Simulación en SUMO (a) y NS-2 (b): baja densidad.	104
Figura 33 Posición de los nodos fuente y destino a los $t=50s$ (a) y $t=100s$ (b): baja densidad. ...	105
Figura 34 Simulación en NS-2 del caso 2: baja densidad.	107
Figura 35 Escenario 2 simulado en SUMO y NS-2: media densidad.....	110
Figura 36 Posición de los nodos fuente y destino a los $t=50s$ y $t=100s$: media densidad.	110
Figura 37 Simulación en NS-2 del caso 2: media densidad.	112
Figura 38 Escenario 3 simulado en SUMO y NS-2: alta densidad.	115
Figura 39 Posición de los nodos fuente y destino a los $t=50s$ y $t=100s$: alta densidad.....	115
Figura 40 Simulación en NS-2 del caso 2: alta densidad.....	117
Figura 41 PDR y Throughput en función del número de nodos: media y alta densidad.	121
Figura 42 Delay y Jitter en función del número de nodos: media y alta densidad.	121
Figura 43 PDR y Throughput en función del número de nodos: baja, media y alta densidad.	123
Figura 44 Delay y Jitter en función del número de nodos: baja, media y alta densidad.	123
Figura 45 PDR y Throughput en función del número de nodos: baja y alta densidad.....	124

Figura 46 <i>Delay y Jitter en función del número de nodos: baja y alta densidad.</i>	125
Figura 47 <i>PDR y Throughput en función del número de nodos: baja y alta densidad.</i>	126
Figura 48 <i>Delay y Jitter en función del número de nodos: baja, media y alta densidad.</i>	127

Resumen

Dentro de las VANET la comunicación inalámbrica entre vehículos se considera un fenómeno complejo, ya que, a más de su naturaleza dinámica y cambiante, la presencia de obstáculos, desconexiones de frecuencia, flujo vehicular e interferencias de muchas otras aplicaciones inalámbricas dentro y fuera del vehículo influyen en los parámetros de comunicación. Es así que, el presente trabajo de tesis tiene como objetivo estudiar y analizar uno de estos factores, como es el impacto de la densidad vehicular en los parámetros de transmisión de una comunicación V2V en entornos urbanos. Para simular y analizar lo propuesto se generan tres escenarios con diferentes tipos de densidad vehicular: baja, media y alta, los cuales son simulados con los softwares SUMO, MOVE y NS-2. Para las simulaciones se considera el protocolo de enrutamiento AODV, el modelo de propagación Nakagami y el estándar IEEE 802.11p. Este trabajo se analiza en base a cuatro parámetros cuantitativos: Throughput, Average End to End Delay, Packet Delivery Ratio y Jitter, además se hace uso del software Visual Trace Analyzer el cual permite extraer los datos de las simulaciones. El análisis de resultados a través de las pruebas de simulación indica que existe una variación en los parámetros de comunicación a medida que se varía el flujo vehicular.

Palabras Clave

- REDES AD HOC
- RADIO PROPAGACIÓN
- VANET
- SUMO
- NS-2

Abstract

Within VANETs, wireless communication between vehicles is considered a complex phenomenon, since, in addition to its dynamic and changing nature, the presence of obstacles, frequency disconnections, vehicular flow and interference from many other wireless applications inside and outside the vehicle they influence the communication parameters. Thus, the present thesis work aims to study and analyze one of these factors, such as the impact of vehicular density on the transmission parameters of a V2V communication in urban environments. In order to simulate and analyze the proposal, three scenarios are generated with different types of vehicle density: low, medium and high, which are simulated with the SUMO, MOVE and NS-2 software. The simulated scenarios consider the AODV routing protocol, the Nakagami propagation model, and the IEEE 802.11p standard. This work is analyzed based on four quantitative parameters: Throughput, Average End to End Delay, Packet Delivery Ratio and Jitter, in addition, the Visual Trace Analyzer software is used, which allows extracting the data from the simulations. The analysis of results through the simulation tests indicates that there is a variation in the communication parameters as the traffic flow is varied.

Key Words

- **NETWORKS AD HOC**
- **RADIO PROPAGATION**
- **VANET**
- **SUMO**
- **NS-2**

Capítulo I

Planteamiento del Problema de Investigación

Antecedentes

El tráfico vehicular, la seguridad vial, la contaminación ambiental y la necesidad de conexión junto con el uso de aplicaciones en línea han sido temas de interés universal en los últimos años. Es así que una de las tendencias actuales en las técnicas de comunicaciones inalámbricas es la integración de las ICT (Information and Communication Technology) con las infraestructuras de transporte, que dan lugar a los ITS (Intelligent Transportation Systems). Estos sistemas tienen como objetivo garantizar la seguridad vial, aumentar y mejorar la eficiencia del transporte, facilitar la gestión del tráfico, disminuir la contaminación ambiental, y mejorar la experiencia de conducción (Alam, Ferreira, & Fonseca, 2016).

En base a esto, se han generado las redes VANET (Vehicular Ad hoc Network), que son redes inalámbricas descentralizadas de autoconfiguración que proporcionan medios de comunicación en tiempo real para un número ilimitado de vehículos cercanos. La creación de estas redes logra una alta confiabilidad, escalabilidad y seguridad, por lo que a esta tecnología se las considera como una nueva técnica a ser estudiada.

En VANET existen diferentes tipos de comunicación entre vehículos: V2I (Vehicle to Infrastructure) y V2V (Vehicle to Vehicle); estos tipos de comunicaciones han permitido el desarrollo de una amplia variedad de aplicaciones útiles como enrutamiento dinámico, navegación GPS (Global Positioning System), detección móvil, atención médica de emergencia, etc.

VANET es una tecnología que utiliza a los autos como nodos para establecer una conexión inalámbrica entre ellos sin necesidad de ninguna estación base central ni ningún controlador. Permite que los autos envíen y reciban información entre ellos y el entorno que los rodea. Para esto es necesario que cada nodo almacene la información de la red a la que pertenece y cuente con un algoritmo que controle el envío y recepción de paquetes.

Por otra parte, la implementación física de VANET conlleva muchos desafíos como el costo, el avance de la tecnología y prueba de aplicaciones para proporcionar una comunicación sin errores. Por lo tanto, es importante que antes de la implementación física de cualquier escenario VANET, se deba realizar una simulación completa por computadora para obtener los resultados deseados. Para este propósito, se deben considerar varios aspectos como el modelo de propagación, los protocolos de enrutamiento, los modelos de movilidad, la topología de la red, la topología del entorno, etc. Un buen simulador de VANET es aquel con características y herramientas que permita simular un escenario lo más cercano a la realidad.

Es así, que con el fin de obtener una implementación consistente de diferentes escenarios para entornos VANET, la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) ha formado un grupo de trabajo para establecer los estándares para la comunicación vehicular, proporcionando así una combinación de estándares IEEE802.11p y IEEE1609.x para cumplir con los requisitos de implementación en VANET.

Por lo tanto, en este trabajo y en base a los simuladores gratuitos de movilidad SUMO (Simulation for Urban Mobility), de red NS-2 (Network Simulator 2) y junto con MOVE (Model Generator for Vehicular Networks) se estudia y se analiza bajo el estándar IEEE 802.11p el

impacto que tiene la densidad vehicular en los parámetros de comunicación en una conexión V2V para entornos urbanos.

Justificación e Importancia

En los últimos años, las mejoras en ITS se han centrado en mitigar la congestión del tráfico vehicular para reducir el uso de combustible y las emisiones tóxicas; mejorar la seguridad del tráfico y ofrecer información y entretenimiento móvil a los pasajeros al mejorar la comunicación en carretera y hacer que los vehículos conozcan su entorno. Sin embargo, para alcanzar estos requisitos en la comunicación de estas aplicaciones en un escenario VANET, es importante mejorar la conexión vehicular y las comunicaciones inteligentes.

Dentro del entorno de las VANET existen requisitos específicos, como las diferentes prioridades de aplicación y la falta de conectividad garantizada, que conducen a la investigación y desarrollo de nuevos protocolos. Entre estos, el enrutamiento de información y la ubicación del nodo son problemas bastante desafiantes debido a su naturaleza altamente dinámica. Por lo tanto, hay muchos desafíos en VANET que deben resolverse para proporcionar servicios confiables.

Además, las redes VANET muestran entornos con características desfavorables para el funcionamiento de una comunicación Wireless tales como: alta densidad de tráfico, alta movilidad de los nodos, requerimientos de escalabilidad, y una amplia variedad de condiciones ambientales; por consiguiente, los canales de comunicación pueden sufrir fácilmente una ruptura o congestión. Por lo tanto, el flujo vehicular presenta un reto para los algoritmos de optimización en las VANET, los cuales deben estar orientados a mejorar el uso del ancho de banda.

Por otra parte, la implementación y pruebas de las VANET en un ambiente real implica un alto costo y mano de obra intensiva ya que necesita mucho trabajo y consume mucho tiempo, ante esto los softwares de simulación se presentan como una alternativa útil para estudiar el rendimiento de estas redes en diferentes condiciones. Además, la necesidad de conocer el funcionamiento y comportamiento en un entorno real de una VANET junto con las herramientas de simulación nos lleva a establecer diferentes parámetros que se deben considerar al momento de trabajar con una red de características únicas, expuesta a múltiples conexiones variables y a los constantes desplazamientos de los nodos en la red.

El emplear herramientas de simulación gratuitas como lo es SUMO, NS-2 y MOVE que son herramientas de simulación implementadas y probadas en otros proyectos de redes vehiculares, motivan al estudio, análisis y creación de nuevos servicios para los ITS. Estos servicios son categorizados en tres grupos: seguridad, eficiencia del tráfico y entretenimiento e información.

Por lo tanto, en base a lo expuesto anteriormente y teniendo en cuenta la tendencia e impacto de esta tecnología y sus respectivas aplicaciones, en el presente trabajo se pretende estudiar y analizar mediante el uso de escenarios simulados el impacto que genera la densidad vehicular en los parámetros de comunicación. Esto se lo realiza mediante la integración de los simuladores NS-2 y SUMO a través de MOVE, con los cuales se crea un escenario en el cual se considera los parámetros de transmisión y la movilidad de los vehículos bajo un modelo de tráfico vehicular real. Este trabajo de investigación se lo lleva acabo con la finalidad de analizar la transmisión de datos en una comunicación V2V y de esta manera ayudar en la toma de decisiones de enrutamiento y proporcionar mejores servicios en cuanto a sistemas de comunicación VANET.

Alcance

A través del presente trabajo de investigación se estudia y analiza mediante simulación el impacto que representa la densidad vehicular en los parámetros de transmisión en una red VANET. Para lo cual se analizan cuatro parámetros de transmisión: Throughput, Packet Delivery Ratio, Average end to end delay y Jitter los cuales son representado mediante tablas y gráficas.

Un aporte importante del presente trabajo es la implementación de una metodología para el análisis de estos parámetros de transmisión dentro de un escenario urbano, la misma que puede ser utilizada para otros tipos de investigación referentes a VANET.

Como primera etapa del presente trabajo ésta se centra en la obtención de información de mapas reales y georreferenciados, los cuales son descargados desde el servidor de OSM (OpenStreetMap) para establecer así un entorno urbano realista. Luego con el uso de la herramienta de optimización de mapas JOSM (Java Open Street Map) se modifica y edita el entorno descargado para una mejor visualización en las simulaciones.

En la segunda etapa se genera el modelo de movilidad con el simulador SUMO donde se precisa la cantidad de vehículos y su movilidad, esto se lo realiza para posteriormente exportar en forma de traza el desplazamiento generado por los vehículos al simulador de red NS-2 en donde se establecen los parámetros de comunicación en base a los protocolos de enrutamiento, protocolos de comunicación y modelos de propagación.

Finalmente, definido el modelo de movilidad y la conexión V2V se procede a extraer los datos obtenidos en las simulaciones a través del archivo de traza generado por NS-2 con el software Visual Trace Analyzer. Estos resultados permiten establecer analices estadísticos en

cuanto a los parámetros de transmisión, los cuales varían en base al número de nodos (densidad vehicular).

Objetivos

Objetivo General

Analizar el impacto de la densidad vehicular en los parámetros de transmisión de datos en una conexión V2V bajo el estándar IEEE 802.11p aplicado a redes vehiculares VANET para entornos urbanos.

Objetivos Específicos

- Conocer el estado del arte y los conceptos básicos relacionados a las redes VANET.
- Definir una metodología para la medición de los parámetros de transmisión en una comunicación V2V basados en simuladores de software de movimiento y conectividad vehicular.
- Desarrollar un análisis estadístico de los resultados obtenidos mediante simulación, definiendo sus principales implicaciones en los parámetros de comunicación V2V.

Descripción General del Trabajo

El presente documento está estructurado de la siguiente manera:

En el capítulo 1, se expone de manera general la reseña del trabajo de titulación, así como los antecedentes, justificación, importancia, alcance y objetivos.

En el capítulo 2, se abarca el estado del arte con las temáticas relacionadas al proyecto y se detalla la teórica de las VANET, teniendo en cuenta sus características principales como su arquitectura, protocolos de comunicación, protocolos de enrutamiento, modelos de

propagación, tipos de aplicaciones y las herramientas de simulación para generar los modelos de movilidad y de red.

En el capítulo 3, se describe la metodología para la integración e interacción de los diferentes simuladores SUMO, NS-2 y MOVE. Se define además el escenario seleccionado en donde se lleva a cabo las pruebas de simulación, así como también los parámetros de transmisión a ser medidos.

En el capítulo 4, se muestran y analizan los datos obtenidos en las simulaciones mediante gráficos y tablas comparativas.

Por último, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas del presente trabajo, además de los trabajos futuros que pueden generarse a partir de este estudio.

Capítulo II

Conceptos y Generalidades

Estado del Arte

Los VANET desempeñan un papel importante en los Sistema de Transporte Inteligente (ITS) ya que proporcionan aplicaciones y servicios relacionados a la seguridad y a la eficiencia del transporte urbano utilizando tecnologías electrónicas y de comunicación avanzadas (Alam, Ferreira, & Fonseca, 2016). Esto ha llevado a que investigadores de diferentes ámbitos desarrollen aplicaciones, protocolos y herramientas de simulación para estudiar y mejora el desempeño de estas redes.

Es así, que trabajos como el de Zuo (Zuo, Wang, Liu, & Zhang, 2010) propusieron el parámetro de densidad de vehículos para optimizar el rendimiento de los protocolos AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector) y OLSR (Optimized Link State Routing) bajo dos modelos de movilidad típicos en VANET. Los resultados mostraron mejoras en el rendimiento de estos protocolos al aumentar el número de nodos alrededor del receptor, siendo AODV mejor que OLSR. Sin embargo, en este trabajo, mantuvieron inalterados otros parámetros como el modelo de propagación, la potencia de transmisión, el número de paquetes enviados y el área de simulación.

Por otra parte, el trabajo desarrollado por Khorashadi y otros autores (Khorashadi, Chen, Ghosal, Chuah, & Zhang, 2007) analizaron los efectos de la potencia de transmisión y su efecto en el rendimiento del protocolo UDP (User Datagram Protocol) en las VANET. Los resultados mostraron que el principal factor atenuante en las VANET es el número de saltos entre la fuente y el destino. Demostraron que al aumentar la potencia de transmisión el número de saltos se reduce, con lo que aumenta efectivamente el rendimiento. Los autores también

constataron que el efecto de la densidad vehicular sólo es importante en los rangos de transmisión más bajos para proporcionar la conectividad requerida.

Cenerario, Delot, y Ilarri por su parte (Cenerario, Delot, & Ilarri, 2011) describieron en detalle un protocolo de difusión vehicular que permite compartir información como los espacios de estacionamiento disponibles, los accidentes u obstáculos en la carretera, etc., mediante el uso de comunicaciones de vehículo a vehículo. En este trabajo, los autores variaron algunos factores como el flujo vehicular y la velocidad de los vehículos. Con el uso de este protocolo lograron adaptar dinámicamente el área de difusión, considerando la relevancia de los eventos para los vehículos. Y además se minimizó el uso de la red, al evitar las difusiones de mensajes que no eran realmente necesarios para llegar a todos los vehículos previstos.

Sahoo y otros autores (Sahoo, Wu, Sahu, & Gerla, 2011) propusieron un protocolo de transmisión multisalto basado en el estándar IEEE 802.11p para abordar el tema de la propagación de mensajes de alerta en las VANET. En este trabajo, los autores variaron la densidad de los vehículos y su velocidad, sin alterar otros parámetros como la periodicidad de los mensajes, el modelo de propagación radioeléctrica y el rango de transmisión. Concluyeron que este protocolo mejora la transmisión de la señal al reducir el retraso incurrido antes de elegir el nodo de retransmisión en cada salto y que el rendimiento constante de la capa MAC es independiente del número de nodos.

De la misma manera, Liu y Chigan (Liu & Chigan, 2012) en su trabajo propusieron la difusión de mensajes basada en la posición relativa (RPB-MD) para transmitir mensajes de manera confiable y eficiente a los vehículos en zonas de relevancia. Este esquema utilizó una transmisión direccional con el fin de que varios nodos seleccionados retengan el mensaje y así

obtener una alta confiabilidad. Además, para garantizar la eficiencia, los parámetros de tiempo del protocolo fueron diseñados de manera adaptativa de acuerdo con los atributos del mensaje y la densidad de tráfico vehicular local. Estos resultados mostraron una alta relación de entrega y baja sobrecarga de datos.

Por su parte Sormani y otros autores (Sormani, y otros, 2006) definieron una función de propagación de mensajes que codifica la información sobre las áreas objetivo y rutas preferidas por los vehículos. De este trabajo se concluyó que la selección de diferentes aplicaciones provoca diferentes enrutamientos, los cuales tienen en cuenta las situaciones de conexión y desconexión entre vehículos. Estos protocolos mostraron un rendimiento notable en escenarios simples con baja y alta densidad de vehículos, sin embargo, en sus simulaciones no se hace uso de mapas reales.

Por otro lado, Huhtonen (Huhtonen, 2004) en su trabajo realizó un estudio comparativo entre los protocolos OLSR y AODV. De este estudio se evidenció que los protocolos proactivos crean una notable eficiencia de enrutamiento mejor que los protocolos reactivos en la red, incluso con un tráfico denso. Además, señala que en una red con alta densidad vehicular y tráfico esporádico el protocolo OLSR es más eficiente, mientras que el rendimiento del protocolo AODV es mejor en redes con un tráfico estático.

Otros protocolos como GyTAR (Greedy Traffic Aware Routing) se implementaron en el trabajo de Jerbi (Jerbi, Sidi, Meraihi, & Ghamri, 2007), en donde se realizó una comparación con los protocolos GSR (Geographic Source Routing) y LAR (Location Aided Routing). Demostrando mediante simulación comparativa que GyTAR supera a LAR y GSR en términos de relación de entrega de paquetes, retraso de extremo a extremo (delay) y sobrecarga de enrutamiento. La

implementación de este protocolo fue importante ya que utilizaba la topología del mapa y el flujo vehicular para seleccionar eficientemente las uniones adecuadas que cruzaban los paquetes para llegar al destino.

De la misma manera Khairnar y Kotecha (Khairnar & Kotecha, 2013) cotejaron el rendimiento de los protocolos AODV y DSR (Dynamic Source Routing), empleando el algoritmo GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) al considerar diferentes tipos de parámetros como el retraso promedio de extremo a extremo, el jitter y la relación de entrega de paquetes. Emplearon el software SUMO para proporcionar un patrón de movilidad del vehículo y el simulador NS-2 para evaluar el rendimiento del algoritmo. De este trabajo se concluyó que AODV es mejor en la relación de entrega de paquetes y GPSR supera a los otros protocolos en cuanto a rendimiento de la red. Sin embargo, con una mayor movilidad de nodos, AODV empeora en el rendimiento, pero trabaja mejor en la relación de entrega de paquetes. Por su parte GPSR trabaja mejor que AODV para una mayor movilidad de nodos en el retraso de extremo a extremo y rendimiento, pero DSR funciona mejor en caso de paquetes perdidos. Por lo tanto, en su trabajo para simular el tráfico vehicular se prefirió GPSR sobre DSR y AODV.

Por su parte Sharma y Mukherjee, (Sharma & Mukherjee, 2012), haciendo uso del simulador NS-2 estudiaron el rendimiento de los protocolos AODV, DSDV (Destination Sequenced Distance Vector) y DSR en función del número de nodos, entrega de paquetes y el retardo de extremo a extremo. De este trabajo se concluyó que los protocolos DSVD y DSR son mejores en rendimiento, pero a medida que aumenta la densidad vehicular, el protocolo AODV se vuelve apropiado para el enrutamiento.

Los autores Pranav, Kapang y Tuithung (Pranav, Kapang, & Tuithung, 2011) por su parte presentaron su trabajo donde establecieron dos escenarios de tráfico: uno urbano y otro de carretera; los cuales trabajaron bajo los protocolos AODV y DSR. Para las pruebas de simulación utilizaron los softwares NS-2 y SUMO junto con MOVE (Model Generator for Vehicular Networks). En este trabajo se observó que ambos protocolos funcionan bien en los dos escenarios, sin embargo, a medida que aumentaba la densidad vehicular AODV era mejor que DSR.

En cuanto a los modelos de propagación en VANET, trabajos como el de Giordano y otros autores (Giordano, Frank, Ghosh, Pau, & Gerla, 2009) estudiaron y analizaron los modelos de propagación y su impacto en los protocolos de enrutamiento. Compararon el modelo de TwoRayGround y el modelo de Esquina en un escenario urbano. Además, identificaron una serie de factores que socavaban la validez del modelo TwoRayGround, por ejemplo, la presencia de edificios provocaba perturbaciones de propagación y los efectos fronterizos compensaban incorrectamente la presencia de terminales ocultos en las redes. En este trabajo, los autores variaron el alcance de la transmisión, el área del mapa y el modelo de propagación radioeléctrica, manteniendo inalterados otros parámetros como el flujo vehicular, el protocolo de comunicación y el tamaño de paquetes.

Por otra parte, estudios como el Poonia y Singh (Poonia & Singh, 2012) evaluaron varios modelos de propagación de radio respecto a VANET. Estos modelos de propagación fueron cotejados con el modelo de TwoRayGround implementado en NS-2. Los resultados obtenidos en las simulaciones concluyeron que modelos de propagación de radio realistas como el modelo Nakagami influyen en los parámetros de transmisión en relación al número de nodos.

En cuanto a los modelos de movilidad, trabajos como el de los autores Jin y Recker (Jin & Recker, 2010) presentaron un modelo analítico para la conectividad de múltiples saltos suponiendo que las posiciones de los vehículos se conocen por simulaciones u observaciones. Asumieron que la propagación de información es instantánea con respecto al movimiento del vehículo.

En cuanto a las herramientas de simulación de red, Borboruah y Nandi (Borboruah & Nandi, 2014) presentan un análisis, donde se discute sobre los simuladores de red actuales como NS2, NS3, NETSIM, OPNET, OMNET ++, y QualNet comparándolos y desatancando sus características más significativas. Sus conclusiones se centraron en la cantidad siempre variable de los nodos móviles, además, su investigación también apuntó a la mejora del estado de los simuladores de red.

Por otra parte, el trabajo presentado por Yan y Rawat (Yan & Rawat, 2016) analizó la conectividad inalámbrica V2V en base al efecto de la distancia de avance, la aceleración, el tiempo de configuración de conexión, el rango de transmisión y el tamaño de los mensajes en base al modelo de corto alcance. De este trabajo se dedujo que factores de comunicación, como el protocolo de enlace, el rendimiento de la red y el tiempo de respuesta pueden afectar significativamente la comunicación V2V. Por lo tanto, concluyeron que la selección de la tecnología inalámbrica depende de los servicios y aplicaciones que se pretenda dar a la comunicación V2V.

Actualmente, se han propuesto nuevos protocolos, como los estudiados en el trabajo de Wahida y otros autores (Wahida, Ikram, Ahmada, Alia, & Alia, 2018). Estos protocolos son comparados en base a parámetros de red, distancia, velocidad, número de nodos, sobrecarga de

comunicación, herramientas y parámetros de simulación, modelos de movilidad y métricas de rendimiento. En este trabajo se comprobó que el rendimiento de los protocolos de enrutamiento en las redes ad hoc depende en gran medida del escenario operativo, ya que la variación de éste genera un gran impacto en el enrutamiento y que influye significativamente en las redes VANET debido a su función de alta velocidad y naturaleza cambiante.

Marco Teórico Referencial

Red Ad Hoc

Esta red se caracteriza por no contar con un controlador central o un punto de acceso, lo que permite que todos los dispositivos se consideren iguales y se comuniquen directamente entre sí. Otras características particulares de esta red son: la comunicación autónoma, la distribución dinámica de los datos, la autoconfiguración y la posibilidad de utilizar protocolos de enrutamiento. No necesitan de infraestructura y admiten nodos móviles, así como un número variable de nodos, lo que hace que este tipo de redes sea apropiado para escenarios dinámicos. Además, esta tecnología proporciona la capacidad de adaptarse a las topologías cambiantes, permitiendo que los nodos ingresen y salgan del sistema sin perder las características de la red o disminuir su rendimiento, por lo tanto, el empleo de las redes ad hoc en VANET es imprescindible.

Vehicular Ad Hoc Network (VANET)

Las redes vehiculares VANET involucran el intercambio de datos entre vehículos y el entorno de las carreteras en tiempo real. Es un tipo de red inalámbrica cuyos nodos pueden transmitir datos sin la necesidad de dispositivos externos como enrutadores o puntos de acceso.

Por lo tanto, se la considera una red descentralizada, sin infraestructura y autoorganizada en donde cada nodo presenta el mismo estado en la red y son libres de unirse y conectarse con otro nodo. Además, se diferencia de otras redes inalámbricas como Wi-Fi, Wi-Max, etc.

Por otra parte, VANET es considerada un tipo especial de MANET, en la que los vehículos actúan como nodos móviles limitados a las topologías de las carreteras. Sin embargo, debido a los modelos de movilidad y las variantes arquitecturas de red, los protocolos de enrutamiento diseñados para MANET no funcionan bien en las VANET.

En la Tabla 1 se muestra una comparación de los parámetros técnicos que existen entre las redes MANET y VANET.

Tabla 1

Comparación de los parámetros técnicos entre MANET y VANET.

Parámetros	MANET	VANET
Coste de producción	Barato	Costoso
Variación en la topología	Lento	Frecuente y muy rápido
Frecuencia de cambio en la topología	Bajo	Alto
Densidad de nodos	Disperso	Frecuentemente variable y denso
Ancho de banda	Cientos de kbps	Miles de kbps
Enrutamiento multisalto	Disponible	Débilmente disponible
Fiabilidad	Media	Alta
Modelo de movimiento de los nodos	Aleatoria	Regular
Esquema de direccionamiento	Basado en atributos	Basado en la posición

Propiedades VANET

VANET tiene muchas similitudes con MANET, como la transmisión de múltiples saltos, cambios dinámicos de topología, autoorganización, etc. Sin embargo, VANET tiene sus propias características distintivas como son:

- **Topología Altamente Dinámica:** Como se ha indicado anteriormente, el movimiento en VANET está restringido por la topología de la carretera; sin embargo, la topología del movimiento individual de los nodos es altamente dinámica debido, al menos parcialmente, a la alta velocidad y, en algunos casos, a los movimientos impredecibles de los nodos. Como resultado, la comunicación entre los nodos dura poco tiempo, por lo que el tiempo de intercambio de datos es muy corto; es decir, la conexión es extremadamente intermitente. Este comportamiento tiene un efecto adverso en los mecanismos de enrutamiento y hace que sea un desafío lograr una buena calidad de servicio para diferentes aplicaciones.
- **Interrupciones en los Enlaces:** Como consecuencia de la alta movilidad, la interrupción de los enlaces es frecuente en VANET, lo que resulta en rutas inestables. Las interrupciones de enlace son particularmente importantes en caso de localidades urbanas y escenarios sin línea de vista (NLoS). Para el primer caso, la comunicación es discontinua, mientras que para NLoS, la comunicación se deteriora, lo que lleva a interrupciones de los enlaces y roturas de la red. Sin embargo, este problema puede mitigarse utilizando puntos de acceso a lo largo del camino para mejorar la conectividad.
- **Pronóstico de la Movilidad:** En comparación con MANET, los patrones de movilidad en VANET son relativamente predecibles debido a la conocida topología de la

carretera, sin embargo, dada su alta movilidad vehicular y rutas dinámicas, predecir el movimiento de los nodos no es una tarea fácil. Con este fin, se han creado numerosos métodos para predecir los patrones de movilidad como el número de semáforos, la velocidad limitada de los vehículos y la estructura de las carreteras; no obstante, todavía se necesita de un conocimiento previo de los vehículos vecinos, eficientes algoritmos de predicción y perfecta conectividad. Tener una predicción eficiente provoca nuevas aplicaciones y servicios en VANET, así como también ayuda a los servicios basados en la ubicación a funcionar con una mayor QoS.

- **Comunicación Localizada:** En VANET, normalmente los vehículos están equipados con GPS y pueden ser localizados por una identificación o una identificación de grupo basada en su ubicación geográfica. Por lo tanto, el reenvío de datos mediante la selección de un vehículo o grupo de vehículos en las mismas zonas geográficas, por ejemplo: las aplicaciones de seguridad, pueden ayudar a mejorar la entrega de datos y a reducir las retransmisiones. Esta característica de VANET también permite el desarrollo de varias aplicaciones como servicios de localización, servicios multimedia, diagnósticos, etc.
- **Restricciones de Tiempo:** las aplicaciones VANET exhiben una naturaleza sensible a la demora y tolerante a la demora. Así, las aplicaciones de seguridad son sensibles al retraso, mientras que las aplicaciones multimedia son tolerantes a ella y dado que estas aplicaciones conciernen a las vidas humanas es imperativo implementar mecanismos eficientes, rápidos, receptivos y confiables que permitan a los conductores tomar decisiones oportunas y correctas en caso de accidentes.

- **Capacidades de Energía y Almacenamiento:** a diferencia de los MANET los nodos en VANET no solo tienen una fuente de alimentación continua, sino que también tienen capacidades de almacenamiento mucho mejores. En otras palabras, los autos recientes de alta gama están equipados con suficientes recursos de computación, comunicación y almacenamiento para ejecutar una gran variedad de aplicaciones de redes vehiculares.

Aplicaciones VANET

En las VANET, los datos que se intercambian entre las distintas entidades suelen pertenecer a dos clases de aplicaciones: de seguridad y de información. Estos datos se manejan para la gestión del tráfico, la seguridad, la asistencia a los conductores y la información.

Estas aplicaciones presentan un comportamiento, propiedades y características diferentes y tienen requisitos distintos, por lo tanto, su uso depende del contenido que se intercambie entre los vehículos y las entidades externas. Cabe señalar que el tipo de contenido puede variar de una aplicación a otra (Shah, Ahmed, Imran, & Zeadally, 2018). Es así, que las aplicaciones VANET se pueden clasificar en tres categorías principales:

1. **Aplicaciones de Seguridad:** esta categoría es la más importante de las VANET, puesto que está relacionada a la vida de los conductores y pasajeros. Su seguridad es la principal preocupación y, por lo tanto, estas aplicaciones tienen requisitos estrictos de demora, calidad de servicio y seguridad. Estas aplicaciones incluyen, pero no se limitan, a la prevención cooperativa de colisión, cambio de carril, información (límite de velocidad, zona de trabajo y carril cerrado) y advertencias de emergencia (accidentes o condiciones de la carretera), etc., cuya información debe

recibirse por parte de los conductores a tiempo para evitar situaciones no deseadas que pongan en peligro la vida de los ocupantes. Esta aplicación requiere una baja latencia de 100 ms, una distancia de cobertura corta a larga de 300 m a 20 Km, una frecuencia de transmisión mínima de 10 Hz y velocidades de datos bajas/medias de 1 a 10 Kbps (Mir & Filali, 2014). Para los mensajes enviados respecto a las advertencias por accidentes vehiculares, el valor de latencia se restringe a 20 ms.

- 2. Aplicaciones de Información de Tráfico:** estas aplicaciones se utilizan para proporcionar a los conductores información actualizada sobre el tráfico, lo que no solo mejora la vista del conductor, sino que también ayuda al conductor a evitar la congestión del tráfico. El modelo de comunicación para tales aplicaciones es la unidifusión y tiene requisitos menos estrictos que las aplicaciones relacionadas con la seguridad. Esta aplicación requiere una latencia media de 200 ms, una distancia de cobertura corta a media de 300 m a 5 Km, una frecuencia de transmisión mínima entre 1 a 10 Hz y velocidades de datos bajas/medias de 1 a 10 Kbps (Mir & Filali, 2014).
- 3. Aplicaciones de Confort:** esta categoría tiene como objetivo mejorar la comodidad del pasajero y la eficiencia del tráfico. En esta categoría las aplicaciones incluyen información como el clima, ubicación de estaciones de servicio, anuncios comerciales y comunicaciones interactivas como internet en movimiento, películas, etc. Estas aplicaciones generalmente usan enrutamiento de unidifusión para la comunicación y requiere una latencia grande de 500 ms, una distancia de cobertura corta a grande, una frecuencia de transmisión mínima de 1 Hz y velocidades de

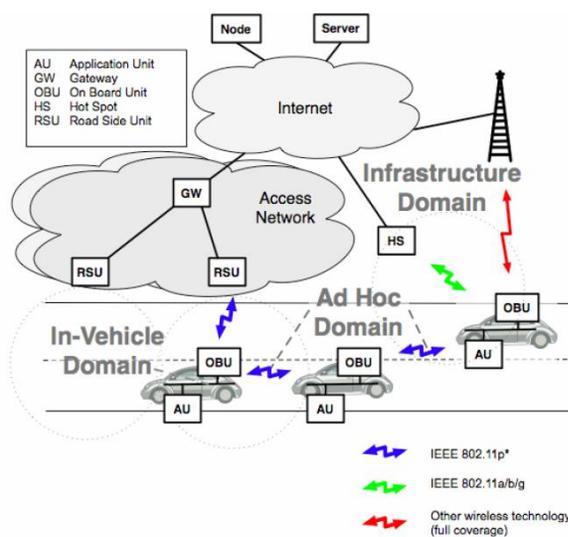
datos de medianas a grandes que van desde los 10 Kbps a cientos de Kbps dependiendo del contenido (Mir & Filali, 2014).

Arquitectura VANET

En la Figura 1 se ilustra la arquitectura para redes vehiculares propuesta por el Consorcio de Comunicación Car-to-Car (C2C-CC), que es el referente principal para muchos proyectos de investigación de I + D (Research and Development). Esta arquitectura comprende tres dominios diferentes:

Figura 1

Arquitectura de referencia C2C-CC para redes vehiculares.



Nota. Tomado de *C2C-C Requirements for Usage of NEMO in VANETs*, por Baldessari, R., Festag, A. & Lenardi, M., 2007, Empowered by Innovation NEC.

- **Dominio Dentro del Vehículo:** hace referencia a la red interna del vehículo. Cada vehículo está equipado con una OBU (On Board Unit), que es un dispositivo con capacidades de conexión V2V y V2I. La OBU implementa la pila de protocolos de

comunicación y debe contar con un dispositivo de red que permita una comunicación inalámbrica de corto alcance basados en el IEEE 802.11p. También puede estar equipado con otras tecnologías inalámbricas, por ejemplo, para acceder a una red celular 3G, 4G y 5G. Por otra parte, las unidades de aplicación (AU) son responsables de ejecutar las aplicaciones y acceder a las OBU a través de una interfaz de conexión (por cable, bluetooth, etc.). Esta distinción entre AU y OBU es solo lógica y, por lo tanto, la AU puede residir en la misma unidad física, puede estar directamente integrada y conectada a la OBU dentro del vehículo o puede ser un dispositivo portátil como una laptop o teléfono móvil que puede conectarse dinámicamente a la OBU.

- **Dominio Ad Hoc:** hace referencia a una red ad hoc inalámbrica pura, conformada por vehículos y RSU (Road Side Unit). Las RSU junto con las OBU forman una VANET de nodos móviles y estáticos, lo que permite comunicaciones totalmente distribuidas y autoorganizadas. Los nodos se comunican directamente si existe conectividad inalámbrica entre ellos o realizan comunicaciones de saltos múltiples en base a un protocolo de enrutamiento predefinido. Por otra parte, las RSU son nodos ubicados a lo largo de las carreteras o autopistas, o en ubicaciones específicas, como señales de tráfico, lugares de estacionamiento o estaciones de servicio. Una RSU tiene las mismas capacidades de comunicación que una OBU; está equipado con al menos un dispositivo para comunicaciones DSR basado en el estándar IEEE 802.11p y también puede estar equipado con otras tecnologías de red para permitir la comunicación.

- **Dominio de Infraestructura:** hace referencia a que las RSU pueden extender la cobertura de VANET y conectarse a una infraestructura de red y al mismo tiempo a Internet. Las RSU pueden permitir que la OBU acceda a dicha infraestructura y de esta manera la AU del vehículo pueda comunicarse con cualquier host en Internet. Sin embargo, las OBU pueden hacer uso de otras redes como las redes celulares (GSM, GPRS, 3G, 4G, etc.) para comunicarse con Internet, así como para usar puntos de acceso público, comerciales o privados de Wi-Fi.

Comunicación VANET

En las VANET, existen diferentes tipos de comunicación, pero las más importantes son:

- **Comunicación Vehículo a Infraestructura (V2I):** En esta comunicación, los vehículos envían mensajes a las RSU y éstas transmiten el mensaje a los vehículos objetivo. La RSU funciona como un dispositivo de retransmisión entre remitentes y receptores, por lo tanto, este tipo de comunicación no es adecuada para mensajes de emergencia, ya que el desarrollo de la comunicación presenta un retraso en la propagación del mensaje, sin embargo, tiene la ventaja de cubrir grandes áreas.
- **Comunicación Vehículo a Vehículo (V2V):** En esta comunicación, cada vehículo es un nodo y puede funcionar como una fuente, un destino y/o un enrutador para retransmitir información relacionada con el tráfico a otros vehículos. El uso de la comunicación V2V reduce el retraso introducido por las RSU en la comunicación V2I. Los vehículos se comunican directa o indirectamente, esto significa que los nodos dentro del mismo rango de señal se comunican directamente y para comunicarse con otros nodos fuera del mismo rango de señal, la comunicación se genera a través

de un nodo intermedio multihop, esto permite el reenvío de datos a un nodo o grupo de nodos. Esta comunicación entre nodos se logra por medio de comunicaciones DSRC (Dedicated Short Range Communication).

Además, en VANET las comunicaciones entre vehículos también puede darse a través de estaciones de carga, dispositivos de comunicación personal y redes inteligentes, y otros servidores basados en la localización (Hussain, y otros, 2017).

En la Figura 2 se ilustran los diferentes escenarios de la comunicación en VANET entre los vehículos para intercambiar información con las RSU y los peatones, así como también con internet y otros servicios que emplean geolocalización. También se muestra la comunicación dentro del vehículo, por ejemplo, la unidad a bordo, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), etc.

Figura 2

Entorno VANET.



Nota. Tomado de *Named Data Networking in Vehicular Ad hoc Networks: State of the Art and Challenges*, por Khelifi, H., y otros, 2019, Communications Surveys and Tutorials.

Transferencia de Datos. Dado que la comunicación V2V se basa en la transferencia de datos es necesario comprender como funciona la capa de transporte y justificar el tipo de PDU (Unidad de Datos de Protocolo) que va navegar por la red configurada. Se han considerado dos protocolos de transporte estándar para este trabajo: UDP (User Datagram Protocol) y TCP (Transmission Control Protocol). Ambos protocolos son utilizados en las simulaciones para la transmisión de datos y trabajan sobre IP (Internet Protocol). Las principales diferencias entre ambos protocolos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Comparación de los protocolos UDP y TCP.

Características	UDP	TCP
Comunicación	No orientado a la conexión	Orientado a la conexión
Fiabilidad	No fiable	Altamente fiable
Velocidad	Baja latencia	Alta latencia
Tamaño de encabezado	8 bytes	20 bytes
Confirmación	No ofrece confirmación de datos recibidos	Reconocimiento de datos (ACK)
Retransmisión de datos	No retransmite	Realiza retransmisiones
Orden	Los paquetes pueden llegar desordenados	Entrega secuenciada
Transmisión	Punto a punto o punto a multipunto	Punto a punto
Paquetes duplicados	No, dado que no se retransmite	Sí, se pueden recibir paquetes con el mismo número de orden
Control de flujo	No realiza control de flujo	Emplea ventanas para controlar el flujo y evitar el congestionamiento de la red

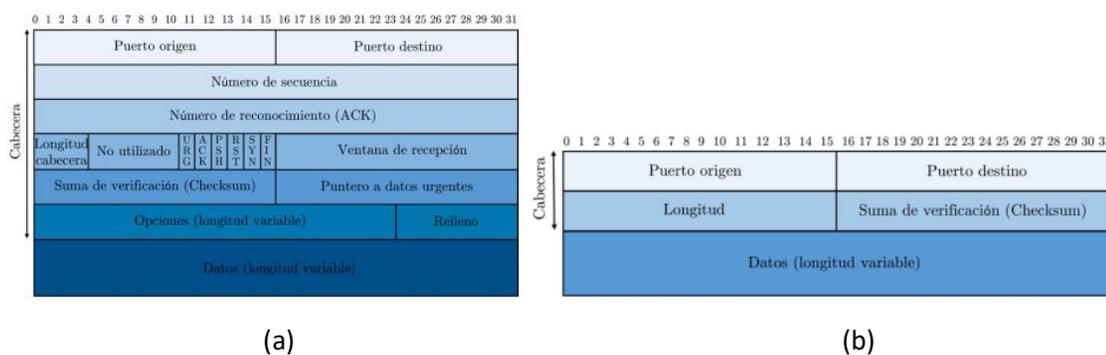
Nota. Tomado de *Evaluación y Modelado de las Comunicaciones entre Vehículos (V2V)*, por Fratilesco P., 2019, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación.

Una de las principales características que diferencia UDP de TCP es el control de los paquetes transmitidos. TCP garantiza a través de retransmisiones un envío seguro y ordenado de los paquetes, y de los segmentos duplicados que estos generan, mientras que UDP no presenta mecanismos de confirmación o retransmisión de datos, no garantiza la recepción de los paquetes en el orden en el que fueron enviados y no supervisa el tráfico en la red. Por lo tanto, estas y otras características pueden establecer ventajas como problemas para la conexión, dependiendo de si se requiere de una máxima fiabilidad o un mínimo retardo en la transmisión.

Por otra parte, los paquetes también tienen una capacidad máxima, que, junto al tamaño de sus cabeceras fijan la cantidad de datos que se pueden enviar. Por lo que, según los datos proporcionado en la Tabla 2, un segmento TCP con lleva una mayor sobrecarga en comparación con un datagrama UDP. La Figura 3 muestra la arquitectura de un segmento TCP y de un datagrama UDP, precisando, en cada caso, las funciones de los bytes de cabecera.

Figura 3

Formato del segmento TCP (a) y del datagrama UDP (b).



Nota. Tomado de *Evaluación y Modelado de las Comunicaciones entre Vehículos (V2V)*, por Fratilesco P., 2019, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación.

El número de puerto se indica con palabras de 2 bytes según se muestra en las estructuras de las PDUs de las Figura 3, por lo que existen 216 valores posibles comprendidos en el rango de 0 a 65535. La asignación de los puertos, según los estándares IANA (Internet Assigned Numbers Authority) se ilustra en la Tabla 3.

Tabla 3

Asignación de puertos.

Puertos	Rango	Descripción
Puertos conocidos	0 – 1023	Reservados para servicios del sistema
Puertos registrados	1024 – 49151	Determinados por IANA para un servicio específico solicitado por una entidad.
Puertos dinámicos o privados	49152 – 65535	Utilizados para uso privados y temporal o asignados de forma dinámica

Nota. Tomado de *Evaluación y Modelado de las Comunicaciones entre Vehículos (V2V)*, por Fratilesco P., 2019, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación.

Como conclusión, el protocolo TCP garantiza la fiabilidad de la conexión a costa de la eficiencia, que disminuye debido a los bytes asociados a la información necesaria en la gestión de fiabilidad. Mientras que UDP carece de fiabilidad, pero proporciona menor latencia, por lo que, el empleo de un protocolo u otro se decide en función de los requisitos de la conexión que se pretenda realiza.

IEEE 802.11p

IEEE 802.11 es una familia de estándares para redes WLAN (Wireless Local Area Network). Su principal objetivo es explicar la implementación de las capas físicas (PHY) y el control de acceso al medio (MAC). Algunos de los principales parámetros de diseño dados en

802.11, son: frecuencia de operación, velocidad de datos, rango de comunicación, técnicas de modulación, establecimiento de enlaces, calidad de servicio y estructura de trama de datos.

En los últimos años el estándar IEEE 802.11 ha presentado algunos cambios particulares respecto a la mejora en la velocidad de transmisión y recepción de datos, técnicas de modulación, ancho de banda y número de canales disponibles dando lugar a varias enmiendas de este protocolo. En la Tabla 4 se muestra una comparación entre estos estándares.

Tabla 4

Especificaciones de la serie estándar WLAN IEEE 802.11

Parámetros	802.11	802.11a	802.11b	802.11g	802.11p
Año	1997	1999	1999	2003	2010
Frecuencia (GHz)	2.5	5.15-5.875	2.4-2.5	2.4	5.86-5.925
Ancho de banda (Mbps)	1-2	Hasta 54	6.5, 11	Hasta 54	3-27
Rango de Transmisión (m)	20-100	30-120	35-140	35~140	300-1000
Compatibilidad	802.11	802.11a	802.11/802.11g	802.11b	802.11a
Modulación	FHSS/DSSS/IR	CCK-OFDM	DSSS/CCK	CCK-OFDM/PBCC	CCK-OFDM
Protocolo MAC	CSMA	CSMA/CA	CSMA/CA	CSMA/CA	CSMA/CA

Nota. Tomado de *A Pervasive Prediction Model for Vehicular Ad hoc Network (VANET)*, por Zhang Q., 2017, Nottingham Trent University.

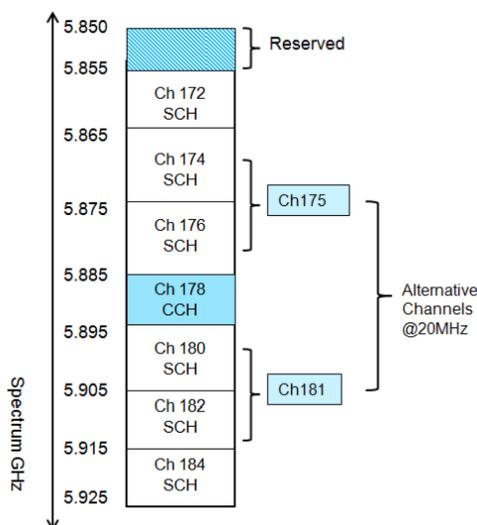
Por otra parte, el IEEE 802.11p se basa en el acceso inalámbrico para entornos vehiculares WAVE (Wireless Access for Vehicular Environment) y múltiples variantes de la familia IEEE 1609 como los protocolos de gestión (IEEE P1609.1), protocolos de seguridad (IEEE

P1609.2) y los protocolos de capa de red (IEEE P1609.3). WAVE es una versión modificada del protocolo DSRC exceptuando gasto de la red y es el responsable de la comunicación V2V y V2I.

Es así que la banda DSRC de 75 MHz se subdivide en un Canal de Control (CCH) y seis Canales de Servicio (SCH), cada uno de ellos con un ancho de banda de 10 MHz. Los 5 MHz restantes están asignados para el intervalo de guarda en la trama DSRC. El objetivo principal del CCH es transportar mensajes cortos de alta prioridad, también conocidos como Mensajes Cortos de Onda (WSM) o datos de administración, mientras que todos los demás datos se transportan en los SCH. Estos mensajes cortos en CCH se utilizan especialmente para la aplicación de seguridad y su arquitectura se implementa con la ayuda del Protocolo de Mensajes Cortos de Onda (WSMP) proporcionado en el IEEE 1609.3. El formato de un espectro DSRC se ilustra en la siguiente figura.

Figura 4

Distribución del espectro DSRC.



Nota. Tomado de *A Synopsis of Simulation and Mobility Modeling in Vehicular Ad-hoc Networks*, por Rehman S., y otros, 2013, IOSR Journal of Computer Engineering.

Por otra parte, es importante entender desde la perspectiva de la implementación que WAVE opera sobre las capas PHY y MAC, por lo tanto, es preciso considerar su implementación en ambas capas, así, uno puede referirse a estas arquitecturas como el protocolo WAVE-PHY y WAVE-MAC.

- **WAVE – PHY:** consta de múltiples canales de comunicación que utilizan un rango de frecuencia de 5.850 GHz a 5.925 GHz de espectro inalámbrico. La técnica de modulación utilizada para los transceptores WAVE-PHY es OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) con un ancho de banda de 10 MHz asignada a cada canal. Aquí, la subcapa PDM (Physical Medium Dependent) permite la comunicación con los transceptores, mientras que la subcapa PLCP (Physical Layer Convergence Procedure) establece la comunicación entre las capas PHY y MAC.
- **WAVE – MAC:** por su parte, es la principal responsable de las operaciones de la capa MAC que resuelve cuándo un nodo puede acceder al canal de comunicación compartido, y programa las transmisiones para minimizar la interferencia en los nodos receptores. Para evitar la congestión, los nodos se basan en el estándar IEEE 802.11p que utiliza la técnica de Acceso Múltiple de Detección de Portador/Evitación de Colisiones (CSMA/CA). En general, la arquitectura WAVE-MAC intercambia datos a través de operaciones multicanal definidas en el estándar IEEE 1609.4

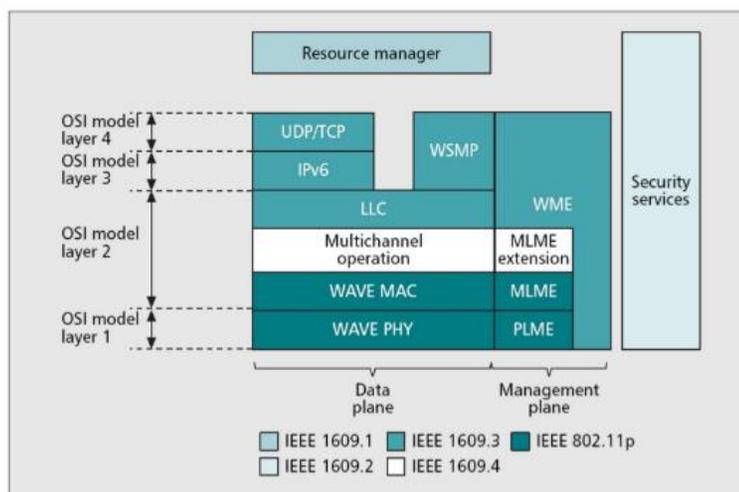
En cuanto a la información de las capas superiores a la capa MAC, esta pende de la aplicación de interés. Es así que en las aplicaciones donde el ancho de banda es una restricción, WSMP (WAVE Short Message Service) es la mejor opción para el uso eficiente del recurso limitado, mientras que, en los escenarios de enrutamiento de múltiples saltos, IPv6 resulta ser la

mejor opción. Además, se debe proporcionarse un mecanismo de filtrado entre la capa MAC y las capas superiores considerando que los paquetes basados en WSMP o IPv6 deben trasladarse desde la capa superior. Para proporcionar mecanismos de seguridad adecuados para estos paquetes, el estándar IEEE 1609.2 proporciona una arquitectura de seguridad detallada.

Por otra parte, para implementar adecuadamente cualquier escenario de aplicación en VANET, es importante comprender la arquitectura de las capas de pila en el protocolo WAVE, ya que en la mayoría de los simuladores de red ésta se pasa por alto, lo que da como resultado un modelado no realista. Una arquitectura detallada en capas del protocolo WAVE se ilustra en la siguiente figura.

Figura 5

Pila de protocolos WAVE para VANET.



Nota. Tomado de *Improving Vehicular Ad hoc Network Protocols to Support Safety Applications in Realistic Scenarios*, por Martínez F., 2010, Universidad Politécnica de Valencia.

En la Figura 5 se observan los protocolos que operan sobre cada capa de red con relación al modelo OSI (Open System Interconnection). Así, el estándar IEEE 1609.1 administra

las solicitudes de comunicación de los dispositivos receptores y transmisores. El estándar IEEE 1609.2 define el tema de seguridad, procesamiento e intercambio de mensajes. Por su parte los estándares IEEE 1609.4 e IEEE 1609.3 son los encargados de la canalización y las capas superiores. Mientras que las características de la capa PHY y MAC están administradas por el estándar IEEE 802.11p (Hartenstein & Laberteaux, 2009).

Protocolos de Enrutamiento

El enrutamiento en VANET es complejo, ya que la alta movilidad de los nodos provoca cambios frecuentes en la topología de la red, por lo tanto, se requiere de protocolos más robustos y flexibles que permitan la transmisión de datos. Es así, que los protocolos de enrutamiento para VANET deben basarse en los siguientes parámetros:

- Operación distribuida.
- Reducción de la señalización.
- Mantenimiento de rutas libres de bucles.
- Reducción del tiempo de procesamiento.
- Gestión de enlaces asimétricos.

Por otra parte, el enrutamiento es un proceso de intercambio de información desde un nodo origen a un nodo destino empleando el camino más eficiente dentro de la red. Sin embargo, dado que los nodos en VANET se unen, abandonan y vuelven a unirse a la red generan una interrupción de datos frecuente y por lo tanto no es posible decidir una solución de enrutamiento estándar para todos los escenarios de VANET.

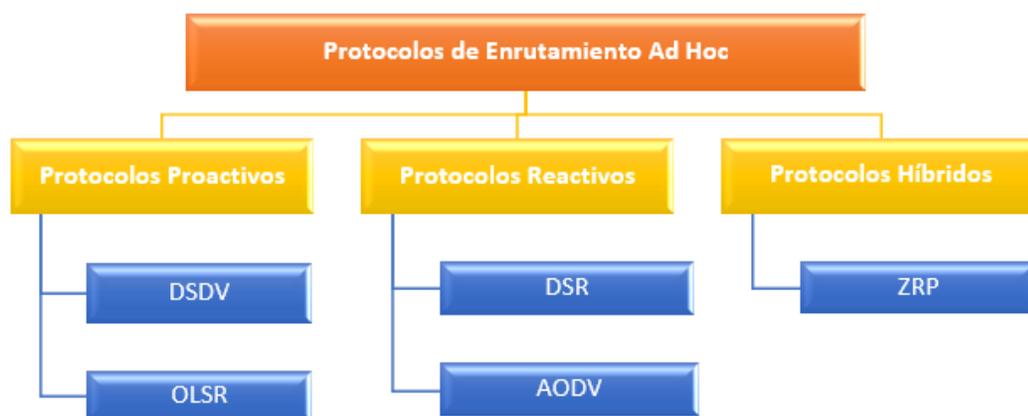
Estos protocolos son los encargados de buscar y encontrar rutas eficientes desde un dispositivo fuente hacia un dispositivo receptor en base a la construcción de una topología

dinámica. Es así, que se han propuesto muchos protocolos para MANET y VANET. Estos protocolos se pueden dividir en tres categorías: proactivo, reactivo e híbrido.

- Los métodos proactivos, también llamados métodos controlados por tablas, estos métodos establecen rutas a todos los nodos de la red incluido los nodos que no envían paquetes. Dichos métodos reaccionan a los cambios de topología, incluso si los cambios no afectan el tráfico de red.
- Los métodos reactivos, también llamados métodos a pedido, se basan en la solicitud de transmisión de datos. Las rutas entre hosts se determinan solo cuando son explícitamente necesarias para reenviar paquetes. Pueden reducir significativamente la sobrecarga de enrutamiento cuando el tráfico de red es liviano ya que no necesitan actualizar la información de ruta periódicamente y no necesitan encontrar y mantener rutas en las que no hay tráfico.
- Los métodos híbridos combinan métodos proactivos y reactivos para encontrar rutas eficientes, sin mucha sobrecarga de control.

Figura 6

Protocolos de enrutamiento ad hoc.



Proactivos. Estos protocolos mantienen rutas a todos los destinos, independientemente de si estas rutas son necesarias o no. Para mantener la información de ruta correcta, un nodo debe enviar periódicamente mensajes de control, sin embargo, estos mensajes pueden afectar el ancho de banda ya que siempre son enviados sin importar el tráfico de red. La principal ventaja de estos protocolos es que los hosts pueden obtener información de ruta y establecer rápidamente una sesión. Se han implementado varios protocolos de enrutamiento proactivo dependiendo del tipo de información de ruta almacenada en las tablas de nodos, así como del método de actualización utilizado. Los más representativos son:

- **DSDV (*Destination Sequenced Distance Vector*):** es un protocolo controlado por tablas de enrutamiento en donde cada nodo contiene información del número de saltos que debe realizar y la sucesión de los mismos hasta llegar a su destino. Estas tablas se actualizan con el cambio de información entre nodos cercanos. En cuanto a las rutas, estas tienen una etiqueta (números) para evitar que se generen bucles e indican el tiempo de duración de la ruta, si el número de la etiqueta es alto, esto indica que el camino es más seguro (Albero, 2012).
- **OLSR (*Optimized Link State Routing*):** es un protocolo proactivo y controlado por tablas de enrutamiento. A diferencia de DSDV, este protocolo comprime la información topológica reduciendo la sobrecarga de la red cuando se transmite. Sin embargo, este protocolo al basarse en el estado de enlace y VANET al ser altamente dinámico provocaría que la capacidad de la red se llene de paquetes de control propios del protocolo, reduciendo los paquetes de información y haciendo un uso poco eficiente del ancho de banda (Jacquet, Laouiti, Minet, & Viennot, 2001).

Reactivos. Estos protocolos pueden reducir drásticamente la sobrecarga de enrutamiento porque no necesitan buscar y mantener rutas en las que no haya tráfico de datos. Esta propiedad es muy atractiva en el entorno de recursos limitados. Se dividen en: protocolos de origen y protocolos de salto a salto o punto a punto.

De Origen. En este protocolo cada paquete de datos lleva toda la información de ruta, por tanto, los nodos intermedios no necesitan actualizar sus tablas de enrutamiento, ya que solo reenvían los paquetes de datos de acuerdo con la información del encabezado. Sin embargo, este proceso conlleva problemas de escalabilidad, ya que, al aumentar el número de saltos, la información de ruta que debe llevar cada paquete de datos se vuelve mayor y puede malgastar ancho de banda. El protocolo de origen más representativo es:

- **DSR (Dynamic Source Routing):** Este protocolo utiliza un algoritmo de enrutamiento de origen en lugar de métodos de enrutamiento por salto. Utiliza la caché de enrutamiento con el fin de almacenar información del enrutamiento de origen para posteriormente enrutar el contenido de la caché cuando se recibe una nueva ruta. Hay dos procesos que enrutan el descubrimiento y mantenimiento de una ruta. Un nodo de origen X que envía un paquete RREQ (solicitud de ruta). Este paquete RREQ contiene información del nodo origen X, la dirección de destino y un identificador. Mientras que el nodo de destino Y recibe el paquete RREQ, en este tiempo el paquete RREQ debe contener la identificación y registro de todos los nodos de X a Y, posteriormente el nodo Y enviará un paquete RREP (respuesta de ruta) al nodo X. La ventaja de DSR es el uso de la caché de enrutamiento para reducir el consumo por descubrimiento de ruta, sin embargo, debido al uso del método de inundación para

solicitar la ruta, los nodos adyacentes RREQ pueden generar conflictos o repeticiones. (Johnson, Hu, & Maltz, 2007).

De Punto a Punto. Estos protocolos pretenden mejorar el rendimiento manteniendo la información de enrutamiento en cada nodo, es decir, en los paquetes de datos ya se no incluye la información de ruta. Por el contrario, solo incluyen la dirección del siguiente nodo donde se debe reenviar el paquete de datos para obtener el destino. Cada nodo intermedio debe buscar y actualizar su propia tabla de enrutamiento para reenviar los paquetes a su destino y de esta manera la ruta se calcule salto por salto. Además, estos protocolos ahorran ancho de banda y trabajan bien en una red grande. El protocolo de punto a punto más representativo es

- **AODV (Ad Hoc On Demand Distance Vector):** Este protocolo mejora el algoritmo de DSDV y se ajusta con DSR. Al ser un protocolo reactivo mantiene la información de ruteo más nueva en su tabla de rutas y como se basa en DSDV también incorpora un identificador que permite discrepar la información actual de la antigua (Albero, 2012). El protocolo AODV incluye tres tipos de mensajes: Route Request (RREQ) que son mensajes que se envían a manera de broadcast en el momento que un nodo solicita una ruta para un determinado destino; Route Reply (RREP) son mensajes que se envían de manera unicast hasta el nodo que realizó la petición y Route Error (RERR) que son mensajes enviados cuando un enlace es inaccesible, por lo tanto, cada nodo envía estos mensajes a sus antecesores hasta llegar a todos los nodos que conforman la ruta.

Híbridos. Estos protocolos combinan los enfoques de enrutamiento proactivo y reactivo. Separan la red en zonas de enrutamiento, de tal modo que se utilizarán esquemas proactivos

para el enrutamiento dentro de las zonas y esquemas reactivos para el enrutamiento entre zonas. El protocolo híbrido más representativo es:

- **ZRP (Zone Routing Protocol):** en este protocolo la red se divide en diferentes zonas donde cada una abarca un grupo de nodos confinados dentro de la longitud del radio de la zona. Si el destino es otro nodo dentro de zona, se emplea el protocolo intrazona proactivo (IARP). De lo contrario, se utiliza el protocolo entre zonas reactivas (IERP) el cual primero reenviará los datos a la zona deseada antes de entregarlos a su destino final. (Kumar & Ramachandram, 2008).

Modelos de Propagación

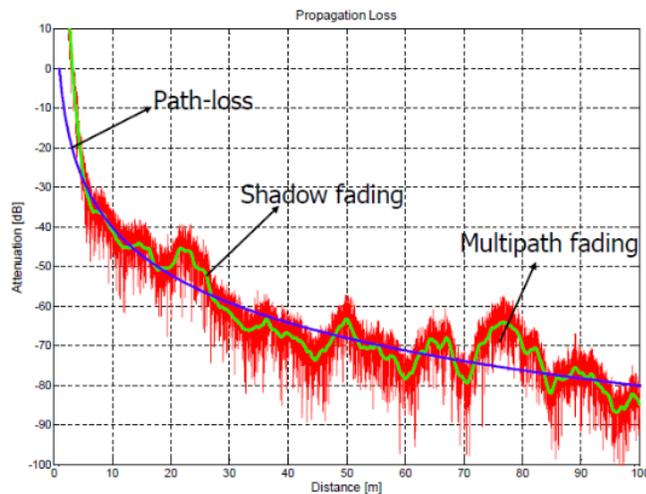
El mayor desafío en las comunicaciones inalámbricas es la limitación de rendimiento que plantea el canal inalámbrico. Una señal electromagnética de propagación es difractada, reflejada, absorbida y dispersada por árboles, terrenos, edificios y otros objetos del entorno. Y dado que dicho entorno cambia constantemente con el tiempo, la señal transmitida se ve afectada de forma impredecible.

Así, para una comunicación V2V puede producirse una fluctuación bastante fuerte del nivel de la señal debido a la reflexión por carreteras y vehículos cercanos, la difracción por edificios y estructuras laterales de la carretera, la dispersión por árboles y terrenos.

La mayoría de los textos que describen canales inalámbricos dividen el modelado de canales en dos partes: efectos de propagación a gran escala y efectos de propagación a pequeña escala. En la Figura 7 se ilustra el comportamiento de estos efectos

Figura 7

Efectos de propagación a gran y pequeña escala.



Nota. Tomado de *Statistical Modeling of Intelligent Transportation Systems Communication Channels*, por Tarikul I., 2013, Delft University of Technology.

Gran Escala. Modelan la potencia de la señal transmitida en función de la distancia (desvanecimiento). Un efecto de este tipo de propagación es el sombreado, que debido a la presencia de grandes obstáculos que dificultan la ruta entre el transmisor y el receptor estos generan una atenuación de la señal (difracción, reflexión y dispersión). Como modelos de propagación a gran escala se encuentran el modelo de espacio libre y el modelo de dos rayos.

Modelo de Espacio Libre. Este modelo considera una ruta de línea de visión (LoS) clara y sin obstáculos entre el transmisor y el receptor. La distancia entre estos se considera como un parámetro para calcular la potencia recibida. Su ecuación es:

$$P_r(d) = P_t G_t G_r \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (1)$$

Donde:

P_t : Potencia transmitida.

G_t : Ganancia de la antena transmisora.

G_r : Ganancia de la antena receptora.

λ : Longitud de onda de la frecuencia de operación.

L : Modelo de pérdida.

Es habitual representar la pérdida de trayectoria como una cantidad positiva medida en dB y definida como la diferencia entre la potencia de transmisión efectiva y la potencia recibida. Para este trabajo, las antenas Tx y Rx en los vehículos se consideran omnidireccionales, por lo que, las antenas tienen ganancia de unidad.

Modelo de Dos Rayos. Es uno de los modelos de propagación más simples que considera un camino directo y un camino reflejado desde la superficie del suelo. Se suele emplear en comunicaciones vehiculares con visión directa (LoS) dada que la reflexión de la señal se genera en la superficie de las vías. Dentro de este modelo de canal, los dos rayos corresponden a la señal de visión directa y a la señal reflejada. En base a este modelo la potencia recibida se calcula de la siguiente manera:

$$P_r = \frac{|E_{total}|^2 \lambda^2}{4\pi\eta} \quad (2)$$

Donde:

P_r : Potencia en recepción.

λ : Longitud de onda.

η : Impedancia intrínseca ($\eta = 120\pi$).

En conclusión, el modelo de dos rayos presenta un ajuste más adecuado para VANET, debido a que se adapta mejor a las comunicaciones vehiculares con visión directa respecto al modelo de pérdidas por espacio libre.

Pequeña Escala. Los efectos de propagación a pequeña escala modelan la variación de la señal recibida debido a la adición destructiva y constructiva de diferentes componentes multitrayectoria de una señal transmitida que se refleja y se dispersa de los objetos en el entorno. Estas variaciones, a diferencia de los efectos de propagación a gran escala no describen las fluctuaciones rápidas de la señal recibida debido al desvanecimiento por múltiples trayectos que ocurren en distancias cortas en el orden de longitud de onda de la señal. Además, en entornos obstruidos, las señales se desvanecen más rápido debido a la reflexión, la refracción y la dispersión, lo que da como resultado que la señal transmitida tome múltiples rutas hacia el receptor.

Es así, que la combinación de ondas reflejadas dirigidas y desfasadas en el receptor produce señales atenuadas, fenómenos conocidos como el desvanecimiento por trayectos múltiples mencionado anteriormente. Además, la velocidad relativa entre el nodo transmisor y el nodo recibido o los objetos circundantes también causa desvanecimiento.

Los principales efectos de desvanecimiento por trayectos múltiples son:

- Cambios acelerados en la intensidad de la señal.
- Modulación de frecuencia aleatoria.

- Dispersión temporal o ecos causados por retrasos en la propagación por trayectos múltiples.

Entre los modelos de desvanecimiento a pequeña escala tenemos los modelos de Rician, Rayleigh y Nakagami.

Rician y Rayleigh. Estos dos modelos representan el caso cuando existen varias rutas indirectas que varían en potencia, amplitud y fase entre el emisor y el receptor. La diferencia entre Rician y Rayleigh es que Rayleigh es una variable aleatoria con media cero, mientras que Rician tiene una media distinta de cero.

El modelo de desvanecimiento de Rician supone la presencia de una componente dominante que generalmente es una señal LOS, mientras que Rayleigh solo tiene en cuenta las señales de trayectos múltiples. En algunos de los modelos de Rician, la onda dominante se puede definir como la adición de dos o más señales diferentes que están desfasadas. Esto puede ser útil, por ejemplo, para modelar la línea de visión más la reflexión del suelo.

La ecuación de Rayleigh viene dada por:

$$P_x(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) & , \quad x \geq 0 \\ 0 & , \quad x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Mientras que la de Rician es:

$$P_x(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} \exp\left[\frac{-(x^2 + s^2)}{2\sigma^2}\right] I_0\left(\frac{xs}{\sigma^2}\right) & , \quad x \geq 0 \\ 0 & , \quad x < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Donde:

x : Variable aleatoria.

s^2 : Potencia de la componente de visión directa.

$2\sigma^2$: Potencia media de las componentes de multitrayecto.

I_0 : Función de Bessel modificada, de primer tipo y orden cero.

El modelo de Rician se basa de una componente preponderante de la señal (en este caso la onda o la suma de ondas que llegan al receptor por el camino de visión directa) y de varias señales debidas al multitrayecto. Mientras que el desvanecimiento de Rayleigh por su parte carece de visión directa y, por lo tanto, supone que todas las señales transmitidas que llegan al receptor se atenúan por igual.

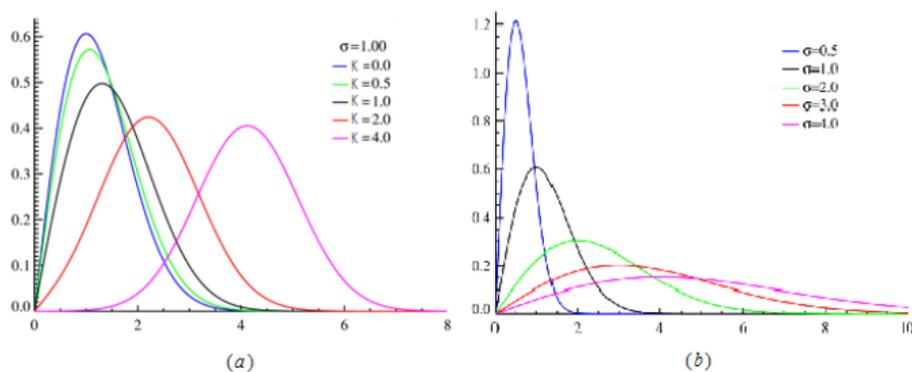
Por otra parte, se ha introducido el factor K que es un parámetro que relaciona la potencia de la señal de visión directa (σ^2) con la potencia media de las señales recibidas por multitrayecto ($2\sigma^2$).

$$K = \frac{s^2}{2\sigma^2} \quad (5)$$

Para el modelo de Rayleigh el valor de K es igual a cero y para señales recibidas únicamente por línea de visión directa K es igual a infinito. Por lo tanto, el factor K mide la intensidad del desvanecimiento, que para valores altos de K esto implicaría un desvanecimiento suave, mientras que valores bajos se presentaría un desvanecimiento acentuado, esto se ilustra en la Figura 8.

Figura 8

Distribución del desvanecimiento a pequeña escala: (a) Rician (b) Rayleigh.



Nota. Tomado de *Performance Evaluation of Realistic Scenarios for Vehicular Ad Hoc Networks with VANET MOBISIM and NS2 Simulators*, por Cañero R., 2011, Universidad Politécnica de Catalunya.

En conclusión, los modelos de propagación de Rayleigh y Rician se utilizan comúnmente para describir los entornos MANET y VANET. Es así, que al modelo de Rayleigh se lo considerará más óptimo para condiciones altamente móviles con NLoS entre nodos, mientras que el modelo de Rician es adecuado cuando hay una ruta LoS directa entre el transmisor y el receptor.

Nakagami. Este modelo presenta una flexibilidad, aproximándose al canal Rician, cuando la separación entre los vehículos es reducida, y al canal Rayleigh, cuando la separación aumenta. Este modelo cubre los efectos de desvanecimiento y estima el nivel de la señal recibida controlando así el multitrayecto de la señal en función del entorno a simular. Este efecto tiene mayor intensidad en entornos urbanos debido a la gran cantidad de obstáculos presente ahí (Jameel, Haider, & Butt, 2017).

La siguiente ecuación corresponde a la función densidad de probabilidad del desvanecimiento Nakagami:

$$f(\gamma) = \frac{1}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\bar{\gamma}(i)} \right)^m \times \gamma^{m-1} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}(i)}\right) \quad (6)$$

Donde:

$\bar{\gamma}(i)$: Relación señal a ruido media para el vehículo.

$\Gamma(m)$: Función Gamma.

$m \left(m \geq \frac{1}{2} \right)$: Parámetro de la forma de distribución.

Para un valor de m igual a uno, el desvanecimiento coincide con la ecuación de Rayleigh, por tanto, se demuestra que la versatilidad que ofrece Nakagami justifica su uso en la estimación del canal, modelando un canal Rician para una corta distancia entre vehículos y un canal Rayleigh para distancias mayores.

Modelos de Movilidad

Estos modelos desempeñan un papel importante en la simulación y tienen un gran impacto en el rendimiento de los protocolos de enrutamiento ya que están directamente influenciados por la movilidad de los nodos. Es así, que las variaciones en la topología del entorno y la alta movilidad de los nodos afectan a la hora de elegir qué nodo es el mejor para ser utilizado como un relé para reenviar información. Por lo tanto, en VANET es importante adoptar un modelo de movilidad que proporcione un entorno de tráfico real.

Existen dos tipos de movilidad: macro movilidad y micro movilidad. La primera consiste en una variedad de características macroscópicas como la topología de la carretera, parques,

edificios, etc., además la caracterización de esta topología también incluye múltiples carriles, límites de velocidad de cada carril, separación física de carriles, etc. Mientras que la segunda hace énfasis a todas las características relacionadas a la velocidad del automóvil, la aceleración, la desaceleración, la distancia con los vehículos vecinos, los criterios de adelantamiento y el comportamiento del conductor.

Según Filali y otros autores (Filali, Harri, & Bonnet, 2009), los factores que afectan a los modelos de movilidad son:

- **Tamaño de Bloque:** un bloque de ciudad puede considerarse como el área más pequeña rodeada de calles. Un tamaño de bloque más pequeño significa más intersecciones obligando a los vehículos a detenerse con mayor frecuencia, por otra parte, un tamaño de bloque más grande aumentaría el efecto de agrupación de los vehículos.
- **Mecanismos de Control de Tráfico:** las señales de alto y los semáforos en las intersecciones generan que los vehículos se detengan y reduzcan su velocidad originando colas y grupos de vehículos. Por otra parte, la velocidad promedio más lenta de los vehículos genera topologías de red más estables y, por lo tanto, un mejor rendimiento de esta.
- **Influencia de los Nodos Circundantes:** los conductores tienden a mantener una distancia mínima entre su automóvil y el que está frente a él. Esto también implica una dependencia en la velocidad de movimiento, aceleración y desaceleración entre dos nodos sucesivos. También debe tenerse en cuenta la posibilidad de cambiar a otro carril para adelantar al automóvil anterior.

- **Velocidad de Movimiento:** determina la frecuencia de variación en la topología de la red ya que al estar directamente influenciado por la velocidad de los vehículos los protocolos de enrutamiento se ven afectados. Además, las características de la calle, como el número de semáforos, el número de intersecciones, su longitud y el tamaño del bloque que afectan la aceleración y la desaceleración de los automóviles generan también un impacto en el rendimiento de la red.
- **Condiciones Climáticas:** la nieve, la lluvia y la niebla pueden disminuir la visibilidad y el control del conductor sobre el automóvil, lo que afecta el movimiento, la aceleración y la velocidad. En algunos casos, las condiciones climáticas pueden obstruir físicamente el movimiento de los automóviles o incluso cambiar el diseño de la calle.
- **Densidad del Nodo:** depende tanto del lugar (pueblo pequeño o una gran ciudad llena de gente) como del tiempo (horas pico). Una mayor densidad da como resultado una mejor disponibilidad de nodos de retransmisión intermedios. Sin embargo, incrementar el número de saltos (nodos) induciría más demora y aumentaría el tamaño de sobrecarga del paquete generando una disminución en el rendimiento de la red.
- **Influencia del Tiempo:** la densidad de los vehículos varía mucho durante un día. Las horas pico ocurren en la mañana y en la tarde en diferentes partes de las carreteras, mientras que las calles se vuelven casi vacías en algunas ciudades después de la medianoche. Además, la visibilidad y las imágenes físicas del conductor difieren enormemente entre el día y la noche, por lo que sus comportamientos de conducción también serán diferentes.

- **Características de los Vehículos:** el movimiento vehicular realista debe considerar que un automóvil o un camión tienen diferencias como la aceleración, la desaceleración o la velocidad, además de que algunas calles presentan restricciones según el tipo de vehículo.

Por lo tanto, para llegar a una simulación del mundo real, se debe generar un modelo de movilidad teniendo en cuenta todos estos factores. Una forma de capturar un modelo realista sería generar patrones a partir de trazas. Pero dado que los VANET aún no se han explotado por completo, obtener rastros realistas parece poco práctico hasta ahora. Por lo que, existen varios modelos que pueden generar patrones de movilidad en base a ciertos criterios. Si bien es difícil presentar escenarios de tráfico del mundo real en un solo modelo de simulación, se pueden adoptar formas para desarrollar un conjunto de aplicaciones que pueda soportar esta implementación.

Los tipos de clasificación para los modelos de movilidad según Orozco y otros autores (Orozco, Chavarro, & Calderón, 2014) son:

- Modelos microscópicos, macroscópicos, y mesoscópicos.
- Modelos sintéticos basados en datos, en trazas y en simuladores de tráfico.
- Modelos aleatorios, de comportamiento y de tráfico.

Microscópicos. En los modelos microscópicos, el comportamiento de cada vehículo se describe individualmente, teniendo en cuenta sus alrededores. En estos modelos la reacción de cada conductor (acelerar, frenar, cambiar de carril) depende del tráfico circundante y se expresa con variables como las posiciones, velocidades y aceleraciones del vehículo. En comparación con los modelos macroscópicos, estos modelos analizan de mejor forma la diversidad del tráfico, lo

que permite simular los efectos de cualquier movimiento de control de tráfico en un vehículo específico o clase de vehículos, por ejemplo, cambiando la ruta de navegación o variando los límites de velocidad para los vehículos. El nivel de detalle permite la visualización de las interacciones entre varios participantes del tráfico (automóviles, camiones, autobuses, ciclistas, peatones, etc.) y la descripción del comportamiento de conducción humana, incluidos errores de estimación, tiempos de reacción, falta de atención y anticipación. Entre otras cosas, los modelos microscópicos se utilizan para evaluar cómo los diferentes estilos de conducción que afectan la capacidad y la estabilidad del tráfico.

Car Following. Todos los modelos de car following están definidos mediante ecuaciones diferenciales ordinarias que describen la dinámica completa de las velocidades y posiciones de los vehículos. La ecuación de movimiento de cada vehículo se caracteriza por una función de aceleración que depende de variables de entrada como: la distancia de parachoques al vehículo principal y la velocidad del vehículo principal. En general, el comportamiento de conducción de un vehículo individual puede depender no solo del líder inmediato sino también de los vehículos que van delante de ese líder.

Estos modelos consideran una relación *estímulo-respuesta* que describen el proceso de control de una unidad *conductor-vehículo*. Esta relación expresa el concepto de que un conductor responde a un estímulo dado con un factor proporcional. La función de estímulo se compone de muchos factores como la velocidad, la aceleración, el espacio entre vehículos, los umbrales del conductor, el rendimiento del vehículo, etc.

Macroscópicos. En los modelos macroscópicos el flujo del tráfico se describe utilizando la analogía con la inmisión de líquidos o gases. Por esta razón, a veces se les llama modelos

hidrodinámicos. Las variables como la densidad vehicular, el flujo y la velocidad media o su varianza son cantidades agregadas localmente que, generalmente varían en el tiempo y el espacio. Estos modelos prestan una visión general del sistema y describen fenómenos colectivos como por ejemplo la evolución del flujo vehicular en un área observada.

Los modelos macroscópicos son muy útiles cuando los datos de entrada requieren fusión y agregación, por ejemplo, cuando provienen de fuentes heterogéneas o hay inconsistencias. Otro efecto secundario útil de estos modelos es que no es necesario considerar los efectos que son difíciles de describir macroscópicamente (cambios de carril, tipos de vehículos heterogéneos y comportamiento), para obtener resultados útiles.

Estas propiedades son particularmente importantes para las estimaciones y predicciones del estado del tráfico, donde el estado del tráfico futuro se predice en un horizonte temporal y las predicciones se actualizan en intervalos de tiempo más pequeños.

Mesoscópicos. Estos modelos presentan una tercera posibilidad intermedia para modelar flujos de tráfico. Combinan enfoques microscópicos y macroscópicos para un modelo híbrido, basado en el análisis de la distribución estadística del comportamiento individual. En la definición de este modelo, los parámetros de un modelo microscópico pueden depender de cantidades macroscópicas como la densidad de tráfico y la velocidad de los vehículos.

En estos modelos solo las partes críticas de la red del tráfico como las intersecciones y los semáforos, se describen microscópicamente; el resto son macroscópicos. A menudo, esta clase de modelos se utiliza cuando existe el requisito de poder ampliar el modelo microscópico para ver el comportamiento del vehículo, pero el sistema general es tan complejo que solo se puede simular con un modelo macroscópico. Se requiere un análisis caso por caso para asegurar

que los detalles requeridos del modelo microscópico salgan a la superficie. Esto significa que no existe un modelo genérico y su definición e implementación varían.

Sintéticos. Se basan en modelos matemáticos que intentan recrear los efectos físicos de la movilidad de los vehículos en forma real. Según Roy (Roy, 2011), los modelos sintéticos pueden dividirse en cinco clases que son las más conocidos en el ámbito de las redes VANET.

- *Modelos estocásticos:* que envuelven todos los modelos que contienen movimientos únicamente aleatorios.
- Modelos de flujo de tráfico: que consideran la movilidad vehicular como un fenómeno hidrodinámico.
- Modelos de seguimiento de automóviles: en donde el comportamiento de cada conductor se modela de acuerdo con los vehículos de adelante.
- Modelos de cola: modelan a los automóviles como clientes y a las carreteras como colas FIFO.
- Modelos de comportamiento: donde cada movimiento está determinado por reglas de comportamiento como las influencias sociales.

Los modelos sintéticos más conocidos para entornos VANET son: Freeway, Manhattan, Random Waypoint, Random Walk.

Freeway. Es un modelo basado en un mapa generado por varias autopistas, que a la vez incluye muchos carriles. No hay caminos urbanos, por lo tanto, no se consideran intersecciones en este modelo. Aquí los nodos se colocan aleatoriamente en los carriles y se mueven utilizando velocidades basadas en un historial, donde la velocidad de cada vehículo cambia suavemente después de una aceleración aleatoria. Además del realismo relacionado con la aceleración y la

velocidad basada en el historial, el modelo define una distancia de seguridad que debe mantenerse entre dos vehículos del mismo carril. Si la distancia entre dos vehículos es menor que esta distancia requerida, el segundo desacelera para permitir que el vehículo hacia adelante se aleje. Este modelo no admite el cambio de carriles, por lo tanto, el vehículo se desplaza en el carril en el que se encuentra hasta llegar al límite del área de simulación, y luego se coloca nuevamente al azar en otra posición y repite el proceso (Roy, 2011).

Manhattan. Es un modelo estocástico que utiliza una topología de carretera en forma de cuadrícula similar a la ciudad de Manhattan. Este modelo emplea un enfoque probabilístico en la selección de movimientos de nodos, ya que, en cada intersección, un vehículo elige seguir moviéndose en la misma dirección con un 50% de probabilidad, y girar a la izquierda o la derecha con un 25% de probabilidad en cada caso (Roy, 2011).

Random Waypoint (RWP). Es quizás el modelo más común en aplicaciones de investigación ya que introduce pausas aleatorias en los vehículos al momento de cambiar de velocidad o dirección. En este modelo, cada nodo elige un destino aleatorio y se dirige hacia él con una velocidad constante aleatoria; al llegar a su destino espera un determinado tiempo y vuelve a seleccionar un nuevo destino y velocidad para nuevamente realizar este proceso hasta que finalice la simulación. Se usa debido a su simplicidad de implementación. Sin embargo, este modelo no captura las características de movilidad de la dependencia espacial, la dependencia temporal y las restricciones geográficas (Roy, 2011).

Random Walk (RWM). Este modelo de movilidad considera que los entornos de simulación están estructurados por celdas en donde cada nodo puede desplazarse a cualquier celda vecina. Aquí cada nodo selecciona una dirección y velocidad aleatoria uniforme en un

intervalo de $[0, 2\pi]$ para luego desplazarse durante un tiempo t hacia su destino. Para cada intervalo de tiempo los nodos seleccionan nuevamente su velocidad y dirección (Roy, 2011).

Generadores de Tráfico. Estos generadores de tráfico se basan en trazas reales y datos obtenidos en el desplazamiento e interacción de los vehículos con los semáforos, intersecciones, cruces, etc. Presenta simuladores de tráfico microscópicos y macroscópicos que permiten configurar las características de cada vehículo y de un grupo de vehículos respectivamente. Son los más utilizados en VANET ya que cuentan con herramientas que modelan de mejor manera el comportamiento vehicular, sin embargo, la mayoría de estos generadores de tráfico son softwares con licencia pagada. Entre los modelos de movilidad que se pueden encontrar en un generador de tráfico vehicular están el modelo de: Krauss, Wagner, Kerner, IDM (Intelligent Driver Model) entre otros.

Kerner. Modela el tráfico vehicular en tres fases:

- Flujo libre: se da cuando la tasa de vehículos por tiempo es menor que la densidad vehicular. Si no se cumple esta condición se considera que el tráfico está congestionado.
- Flujo sincronizado: se da en el tráfico congestionado y se caracteriza por tener una densidad de tráfico que permite viajar con fluidez pero que en ocasiones puede obligar a reducir la marcha.
- Amplio congestionamiento: se da cuando el flujo vehicular es alto y la velocidad a la que transitan los vehículos es casi nula.

Intelligent Driver Model (IDM). Es considerado un modelo determinista, en donde el movimiento de un vehículo depende del movimiento de los vehículos de su entorno, la distancia

mantenida con el vehículo que lo precede y de su propia aceleración. Además, simula características relacionadas con el comportamiento del conductor, el vehículo y su entorno.

Krauss. Es un modelo microscópico que se basa en el control de velocidad de los vehículos, el cual depende de la velocidad del vehículo que lo precede para evitar colisiones y así conservar una distancia de seguridad.

Topología de la Red

Este término hace referencia tanto a la topología del entorno como a la topología de enlaces de telecomunicaciones. Por lo general, el contexto sugiere la definición correcta, pero cuando se trata de VANET, el contexto no es útil porque los dos conceptos están vinculados. Es así, que un gran número de investigaciones en redes vehiculares ad hoc ha demostrado que la topología de la red influye en el rendimiento de las telecomunicaciones y que, dependiendo de la tecnología utilizada, la topología del entorno está directamente relacionada con la red de comunicación en muchos casos. Estudios recientes han demostrado que el posicionamiento óptimo de dichas redes y el impacto de la topología en las telecomunicaciones es importante cuando se trata de implementación en el mundo real.

Una investigación sobre el impacto de la topología en un esquema de enrutamiento geográfico se da en el trabajo de Ducrocq (Ducrocq, Hauspie, Mitton, & Pizzi, 2014) el cual mostró que diferentes topologías pueden generar una diferencia de hasta el 25% en la relación de entrega de paquetes y más del 100% en los costos de energía.

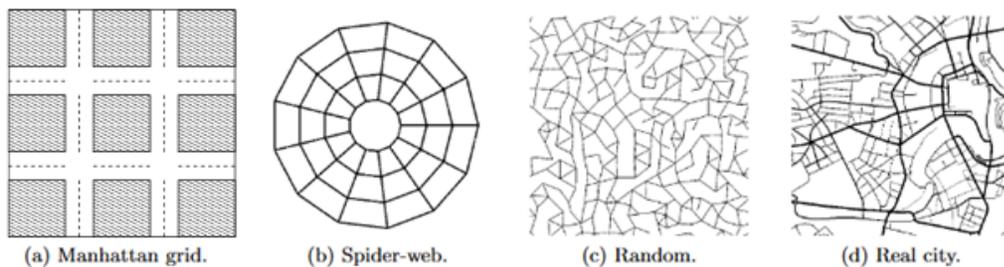
Teniendo en cuenta que dependiendo del problema que se estudie, el uso de un modelo que represente una ciudad real en toda su complejidad puede ser contraproducente en el mejor

de los casos, sino engañoso. Esto es debido a las propiedades y características relacionadas con la evolución de los sistemas complejos.

Es así, que, dado un sistema complejo con un conjunto definido de variables, una pequeña perturbación en el conjunto inicial de valores puede conducir a un resultado completamente diferente. Es por eso que las topologías simplificadas se han utilizado durante años, produciendo resultados más que aceptables y realistas. Entre las simplificaciones más utilizadas de los modelos de ciudades se encuentran (ver Figura 9):

Figura 9

Topologías de red.



Nota. Tomado de *Fractal Cities: A Geometry of Form and Function*, por Batty M., Longley P., 1994.

Cuadrícula de Manhattan. Es un tipo de plan de ciudad en el que las calles corren paralelas e intersecan en ángulo recto entre sí, formando una cuadrícula (Batty & Longley, 1994). Desde una perspectiva de planificación urbana, la inflexibilidad de la cuadrícula conduce al desprecio de las áreas ambientalmente sensibles, como parques, arroyos o bosques. No obstante, el modelo de cuadrícula proporciona una representación racional y simplificada de las calles principales y la red troncal de transporte.

Topología Telaraña. Llamada también red radial. Proporciona una representación simplificada de las calles principales y la red troncal de transporte, cuando se ignora la estructura interna de los bloques. La simetría y la simplicidad de esta topología permite que se use como modelo base para el estudio de muchos problemas.

Topología Aleatoria. Esta topología se construye utilizando gráficos planos. Los estudios existentes sobre la morfología urbana proporcionan valores que se pueden usar para generarlos, es decir, la longitud promedio de una calle y el número promedio de calles en una intersección. La falta de simetría de este modelo es muy útil para estudiar los problemas de optimización, sin embargo, su aleatoriedad puede traer problemas específicos de la propia topología.

Ciudad Real. El uso de una topología real puede ser óptimo al estudiar problemas específicos, pero, por otro lado, su complejidad puede ser abrumadora para un modelo en términos de escalabilidad.

Softwares VANET

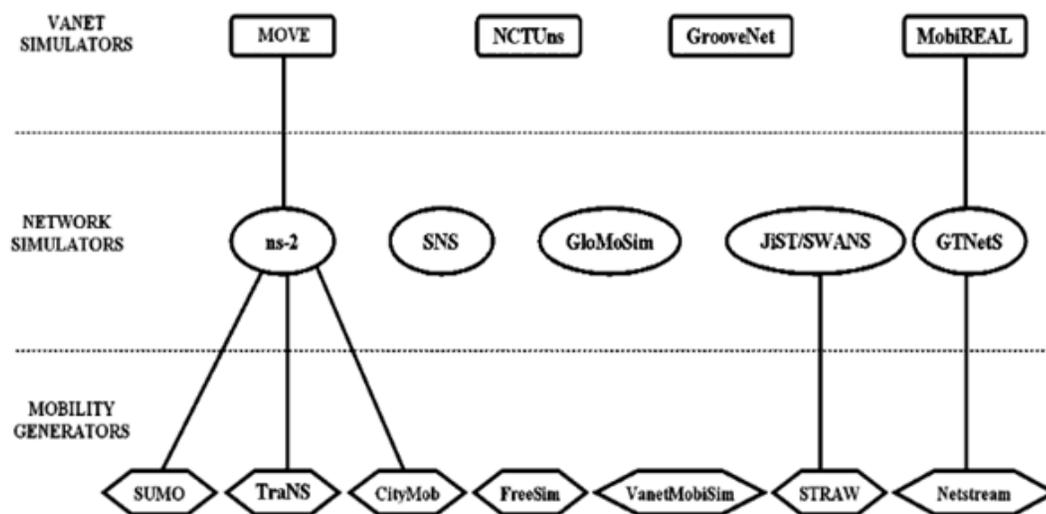
Una red ad hoc vehicular es una red temporal establecida según las necesidades específicas entre los vehículos en movimiento. Debido a la compleja topología y a un entorno rígido, es difícil implementar bancos de pruebas físicos reales para VANET. Por lo que, para minimizar la probabilidad de falla en la implementación física, se debe ejecutar una simulación de red cercana al escenario realista antes de la implementación física. Para lograr esto, se necesita de un simulador de red confiable, flexible y preciso.

En la Figura 10 se presenta la estructura del software para simular un entorno VANET, el cual consta de tres categorías:

1. Softwares generadores de movilidad vehicular o tráfico.
2. Softwares simuladores de red.
3. Softwares simuladores VANET (híbridos).

Figura 10

Estructura del software para una simulación VANET.

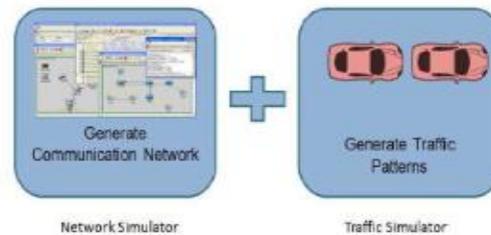


Nota. Tomado de *A Survey and Comparative Study of Simulators for Vehicular Ad hoc Networks (VANETs)*, por Toh C., y otros, 2011.

Simuladores de Movilidad Vehicular. Su principal objetivo es generar patrones de movilidad de vehículos en movimiento bajo ciertos modelos de movilidad predefinidos. Su funcionamiento como se muestra en el esquema de la Figura 11 se basa principalmente en equipar al simulador de red las trazas generadas por el movimiento de los vehículos a fin de mejorar los escenarios realistas de las simulaciones.

Figura 11

Esquema básico de un generador de tráfico para VANET.



Nota. Tomado de *A Synopsis of Simulation and Mobility Modeling in Vehicular Ad-hoc Networks (VANETs)*, por Rehman S., y otros, 2013, IOSR Journal of Computer Engineering Fuente:

Algunos de estos generadores de movilidad son: VanetMobiSim (Haerri, Fiore, Fethi, & Bonnet, 2006), SUMO (Krajzewicz, Hertkorn, Wagner, & Rossel, 2002), STRAW (Choffnes & Bustamante, 2006), FreeSim (Miller & Horowitz, 2007) y CityMob (Martinez, Cano, Calafate, & Manzoni, 2008).

Simuladores de Red. Básicamente un simulador de red genera tráfico de datos, obtiene modelos de tráfico del simulador de movilidad de tráfico, implementa un esquema de enrutamiento adecuado y transmite los datos a través del canal de radio diseñado adecuadamente. Dependiendo de la aplicación los paquetes de datos deben generarse en el simulador de red.

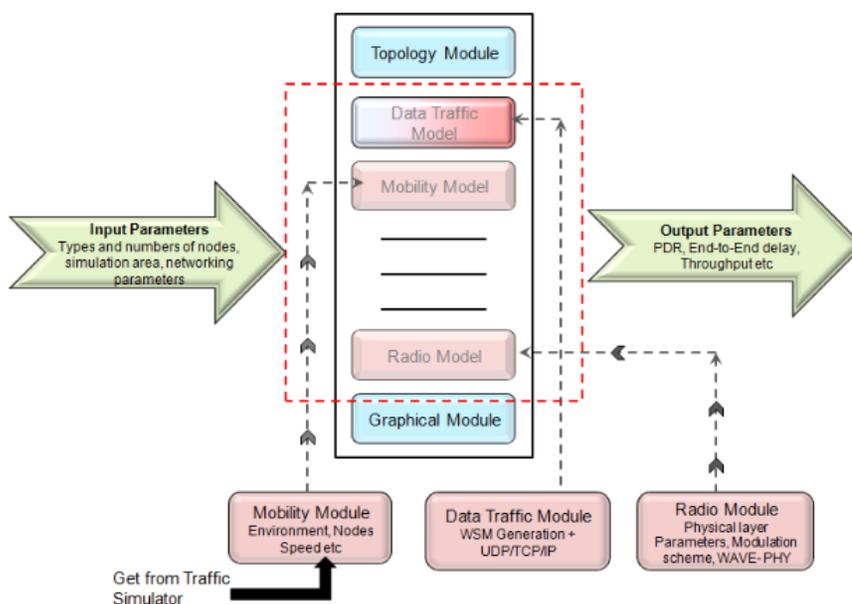
Este simulador debe garantizar que los datos se envíen y reciban correctamente a través del canal de radio para cual debe implementar una estrategia de enrutamiento apropiada para la transmisión. Por lo tanto, es crucial elegir un simulador de red apropiado para la simulación del entorno VANET.

Existen varios simuladores de red de código abierto y comerciales disponibles. La mayoría de estos simuladores poseen una característica única de ser discretos en la programación de eventos y esto los hace altamente confiables para una estructura topológica rígida de redes vehiculares ad hoc.

Algunos de estos simuladores de red son: NS-2 (Issariyakul & Hossain, 2010), NS-3 (Khana, Bilalb, & Othmana, 2013), OMNeT ++ (Varga & Hornig, 2008), OPNET (Mittal & Choudhary, 2014) y GloMoSim (Zeng, Bagrodia, & Gerla, 1998).

Figura 12

Esquema básico de un simulador de red para el entorno VANET.



Nota. Tomado de *A Synopsis of Simulation and Mobility Modeling in Vehicular Ad-hoc Networks (VANETs)*, por Rehman S., y otros, 2013, IOSR Journal of Computer Engineering.

Simuladores Híbridos. La integración entre el generador de movilidad y el simulador de red se realiza a través de dos enfoques principales, el enfoque federado y el enfoque integrado.

El enfoque federado se realiza mediante la construcción de un middleware entre el generador de movilidad y el simulador de red para combinarlos y facilitar la interacción entre ellos durante la simulación. Este enfoque tiene la ventaja de que no es necesario construir un simulador de red y un generador de movilidad desde cero, sino que se combina entre los generadores de movilidad existentes y los generadores de red. La desventaja de este enfoque es la combinación entre dos softwares de diferentes plataformas y sistemas operativos, lo que hace que la integración entre ellos sea difícil, también estos softwares pueden ser una combinación de código abierto y comercial, lo que hace que proporcionar un ciclo de retroalimentación rápido entre ambos softwares sea bastante difícil.

Por otro lado, el enfoque integrado se realiza a través de tres enfoques principales:

- Añadiendo modelos de comunicación de red al generador de movilidad.
- Añadiendo modelos de movilidad y redes de carreteras al simulador de red.
- Desarrollando un nuevo simulador de movilidad y de red que combine ambos.

Muchos marcos de middleware integran simulaciones de red y movilidad que se implementan en dos herramientas de simulación diferentes, combinan ambos simuladores en una herramienta con una interfaz gráfica de usuario accesible. Algunos de estos simuladores de red son TraNS (Piorowski, y otros, 2008), MOVE (Lan, Karnadi, & Mo, 2007) y VEINS (Dressler & Sommer, 2008),

OpenStreetMap y JOSM. OpenStreetMap (OSM) es un proyecto colaborativo para crear mapas editables gratuitos y es uno de los más populares de información geográfica alrededor de todo el mundo (Hashemi & Abbaspour, 2015). Los elementos presentes en OSM pueden ser gratuitamente accedidos, editados y descargados en un archivo .osm que posee estructura XM. Actualmente existen varios métodos para agregar nuevos elementos como la importación de bases de datos, subida de tracks GPS, dibujo sobre imágenes aéreas Bing, entre otros. Estos métodos se han implementado a través de softwares libres conocido como editores. Un ejemplo es el editor de Java OpenStreetMap (JOSM) (Sax-Barnett, 2014) que es un editor extensible de código abierto el cual permite editar los datos de OSM (nodos, formas y relaciones) y sus etiquetas de metadatos.

Capítulo III

Marco Metodológico

En la Figura 13 se ilustra un diagrama de la metodología aplicada para las simulaciones de los escenarios propuestos en este trabajo.

Figura 13

Diagrama del proceso de simulación.

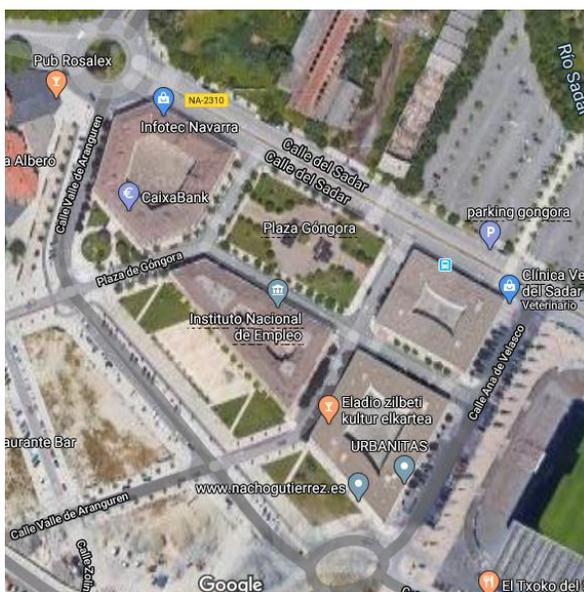


Determinación y Descripción de la Zona Geográfica

El escenario urbano seleccionado donde se lleva a cabo las pruebas de simulación es la Plaza Góngora (WGS84 Latitud/Longitud: 42.79793, -1.63921). Se determinó esta zona ya que presenta características apropiadas para realizar las simulaciones puesto que cuenta con redondeles, varios semáforos en sus intersecciones y presenta una gran afluencia vehicular. En la Figura 14 se ilustra el escenario urbano real seleccionado.

Figura 14

Escenario urbano: vista real desde Google Maps.

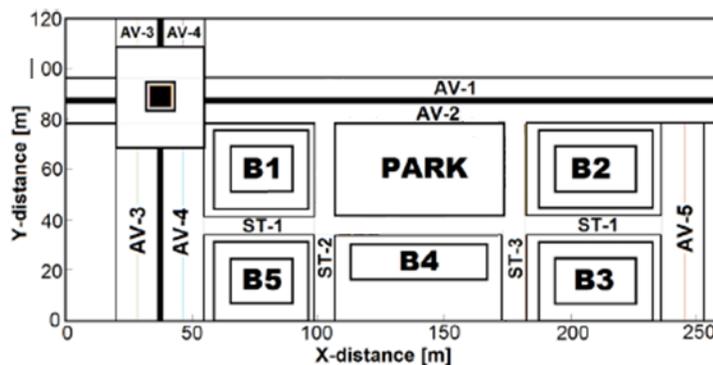


Nota. Tomado de Google Maps, 2020, Google Maps (<https://goo.gl/maps/H9DQkpvawSrqqdkv5>)

En la Figura 15 se ilustra una réplica aproximada de la Plaza de Góngora modelado en JOSM con los nombres asignados a las calles.

Figura 15

Esquema urbano: vista esquemática 2D.



Nota. Modificado de *Spatial V2X Traffic Density Channel Characterization for Urban Environments*, por Granda F., y otros, 2020, *Transactions on Intelligent Transportation Systems*.

Densidad de Tráfico Vehicular

En cuanto a la densidad vehicular, esta se define en base al número de vehículos que ocupan una determinada longitud de autopista o carril y se expresa generalmente en vehículos por milla (vpm) o en vehículos por milla por carril (vpmp). La densidad es difícil de medir directamente ya que es una medida que está más directamente relacionada con la demanda de tráfico.

Por lo tanto, para medir la densidad vehicular se toma en cuenta dos variables: el total de vehículos simulados en el escenario en un tiempo de paso SUMO específico y la capacidad total del escenario (cuando todas las carreteras están ocupadas). La fórmula que permite calcular la ocupación total de las vías es:

$$\text{FOS}[\text{vehicles}] = \frac{\text{Total routes length [m]}}{\text{Vehicles_length [m]} + \text{minGap[m]}}$$

Donde:

Total routes length [m]: Longitud total de las rutas vehiculares.

Vehicles_length [m]: Es igual a 5.0m (SUMO predeterminado).

minGap[m]: Espacio que existe después del vehículo líder (2.5m).

Por consiguiente, para establecer los diferentes escenarios en donde se llevará a cabo las mediciones de los parámetros de comunicación se estableció que el 30% de la ocupación de las vías representa una baja densidad, mientras que el 50% y el 80% se consideran para una medida y alta densidad respectivamente.

En la Tabla 5 se detalla la longitud y la capacidad total que presentan las calles del entorno urbano seleccionado.

Tabla 5

Definición de la densidad de tráfico vehicular

Ruta	Longitud Total [m]	Ocupación Total [total de vehículos]
AV-1 (2 carriles)	453.60	58
AV-2 (2 carriles)	452.44	58
AV-3 (2 carriles)	180.86	22
AV-4 (2 carriles)	181.20	22
AV-5 (2 carriles)	165.34	20
ST-1 (2 carriles)	273.98	34
ST-2 (2 carriles)	85.80	10
ST-3 (2 carriles)	164.30	20
Redondel (2 carriles)	203.74	26
Escenario	2161.26	270

Nota. Tomado de *Spatial V2X Traffic Density Channel Characterization for Urban Environments*, por Granda F., y otros, 2020, Transactions on Intelligent Transportation Systems.

En base a la Tabla 5 el primer escenario a simular constará de un total de 80 vehículos, mientras que, para los otros escenarios, los valores de 135 y 215 nodos representarán los escenarios de mediana y alta densidad vehicular respectivamente.

Software de Simulación

Como se mencionó anteriormente, existen muchas herramientas de software que se han desarrollado para simular entornos VANET, por lo tanto, es preciso realizar una comparación entre sus principales características para determinar que herramienta es la que mejores recursos ofrece para realizar este trabajo.

Simulador de Tráfico

Se necesitan generadores de movilidad vehicular para aumentar el nivel de realismo en las simulaciones VANET. Estos generan trazas de movilidad vehicular realistas para ser utilizadas como entrada para un simulador de red. Es así que las entradas del generador de movilidad contienen el modelo de la carretera y los parámetros del escenario, es decir, la velocidad máxima del vehículo, los tiempos de llegadas y salidas de vehículos, etc.

Por otra parte, la salida de las trazas detalla la ubicación de cada vehículo en todo momento durante el tiempo de simulación y sus perfiles de movilidad. Algunos ejemplos como los ya citados en el capítulo dos son: SUMO, MOVE, CityMob, STRAW, FreeSim, VanetMobiSim. En la Tabla 6 se detalla las principales características de estos simuladores de tráfico mencionados en el capítulo dos.

Tabla 6

Comparación entre los diferentes simuladores de movilidad vehicular.

	VanetMobiSim	SUMO	STRAW	FreeSim	CityMob
Software					
Portabilidad	✓	✓	✓	✓	✓
Libre de licencia	✓	✓	✓	✓	✓
Código abierto	✓	✓	✓	✓	✓
GUI	✓	✓	✓	✓	✓
Ejemplos disponibles	✓	✓	-	✓	
Desarrollo continuo	✗	✓	✗	-	✓
Facilidad de instalación	Moderado	Moderado	Moderado	Fácil	Fácil
Facilidad de uso	Moderado	Moderado	Moderado	Fácil	Fácil
Mapas					
Reales	✓	✓	✓	✓	✗
Definidos por el usuario	✓	✓	-	✗	✗
Aleatorios	✓	✓	✗	✗	✓
Manhattan	✗	✗	✗	✗	✓
Modelos de Tráfico					
Macroscópicos	✗	✗	✗	✓	✗
Microscópicos	✓	✓	✓	✓	✓
Varios carriles	✓	✓	✓	-	✓
Modelos de Tráfico					
Cambio de carril	✓	✓	✓	-	✓
Flujos direccionales separados	✓	✓	✓	-	✓
Limitaciones de velocidad	✓	✓	✓	✓	✓
Señales de tráfico	✓	✓	✓	-	✓
Gestión de intersecciones	✓	✓	-	-	✗
Criterios de adelantamiento	✓	-	-	-	✗
Grandes redes de carreteras	-	✓	✓	-	✓
Movimiento libre de colisión	-	✓	-	-	✓
Diferentes tipos de vehículos	✗	✓	-	✗	✓
Jerarquía de tipos de unión	✗	✓	-	✗	✗
Cálculo de ruta	✓	✓	✓	✓	✗

	VanetMobiSim	SUMO	STRAW	FreeSim	CityMob
Trazas					
Soporte de rastreo NS-2	✓	✗	✗	✗	✓
Soporte GloMoSim	✓	✗	✗	✗	✗
Soporte QualNet	✓	✗	✗	✗	✗
Soporte SWANS	✗	✗	✓	✗	✗
Rastreo basado en XML	✓	✗	✗	✗	✗
Importa diferentes formatos	✓	✓	✗	✗	✗

Nota. Tomado de *A Survey and Comparative Study of Simulators for Vehicular Ad hoc Networks (VANETs)*, por Toh C., y otros, 2011, *Wireless Communications and Mobile Computing*.

Según la Tabla 6 se observa que el software SUMO presenta más parámetros a configurar en cuanto al control de vehículos, por lo tanto, se empleara este software para las simulaciones. Además, esta herramienta es compatible con OpenStreetMap lo que permite cargar mapas de cualquier parte del mundo con su respectiva georreferenciación para posteriormente integrar los movimientos de los vehículos a estos mapas y así simular un entorno de tráfico real. Por otra parte, también brinda la posibilidad de comunicarse directamente con otros simuladores de red como NS-2 para crear un entorno de simulación en tiempo real.

Simulador de Red

En cuanto a los simuladores de red, estos realizan una simulación detallada a nivel de tráfico de datos, rutas, enlaces y canales. Ejemplos como los ya citados en el capítulo dos son: QualNet, NS-2, NS-3, OMNET++ y OPNET. En la Tabla 7 se muestra una comparación de las principales propiedades de estos simuladores de red.

Tabla 7

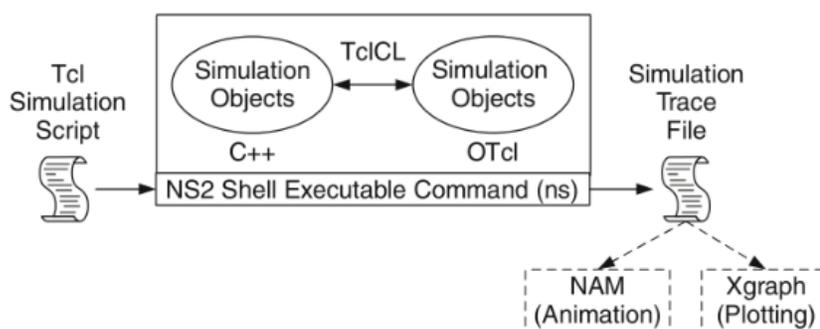
Comparación de los simuladores de red.

	NS-2	NS-3	OMNET++	OPNET	QualNet
Idioma soportado	C++, OTCL	C++, Python	C++	C(C++)	Parsec C++
Soporte de GUI	Bueno	Bueno	Bueno	Excelente	Excelente
Tiempo tomado "aprender"	Moderado	Moderado	Moderado	Largo	Muy corto
Tiempo de "instalación"	Moderado	Largo	Muy corto	Moderado	Corto
Plataforma	Linux, Unix, Windows	Linux, Unix, Windows	Linux, Unix, Windows, MAC OS	Linux, Unix	Linux, Unix, DOS
Herramientas de análisis	SI	SI	SI	SI	SI
Archivos de traza	SI	SI	SI	SI	SI
Herramientas de visualización de red	SI	SI	SI	SI	SI
Simulación rápida	Moderado	Moderado	Moderado	Excelente	Excelente
Ventajas	-Facilidad de agregar un nuevo protocolo -Gran cantidad de protocolos disponibles	-Soporte para virtualización	-Potente GUI	- Comunicación con otros simuladores -Rápido -Escalable	-Potente GUI -Escalable -Rápido - Emulación
	NS-2	NS-3	OMNET++	OPNET	QualNet
Desventajas	-Soporta solo 2 protocolos MAC -Lenguaje de secuencias de comandos familiar	-Enlaces de Python no funcionan en Cygwin -Solo soporte IPV4	-Sin número de protocolos de soporte -Problema de compatibilidad lento	-Producto comercial -Consumo de memoria -Tutoriales insuficientes	-Producto comercial - Instalación difícil en Linux
Publicaciones IEEE/ACM	52%	17%	12%	8%	11%

Según la Tabla 7 se observa que NS-2 ofrece mejores características a configurar en el tráfico de red, por lo tanto, se empleara este software para las simulaciones. Además, esta herramienta es compatible con el software de movilidad SUMO. Además, este software genera archivos con los resultados de las simulaciones, los cuales se pueden cargar en otras herramientas para una mejor visualización de los mismos. En la Figura 16 se ilustra un esquema de la arquitectura de NS-2.

Figura 16

Arquitectura NS2.



Nota. Tomado de *Introduction to Network Simulator NS2*, por Issariyakul T. & Hossain E., 2010.

Por otra parte, NS-2 ofrece parámetros que permiten evaluar el desempeño de la red VANET como es el caso del tipo de antena, interfaz de red, tasa de transmisión, protocolos de enrutamiento, modelos de propagación, capa de enlace, número de nodos, tiempo de simulación, entre otras. Además, otro punto a favor de esta herramienta se da en lo referente a las publicaciones VANET en la base de datos de la IEEE/ACM puesto que la mayoría de estas publicaciones se da con esta herramienta.

Simulador Híbrido

Estos softwares integran simuladores independientes de tráfico y de red en paralelo aprovechando sus mejores propiedades para proporcionar escenarios más realistas, sin embargo, requieren de una elevada capacidad computacional. En la Tabla 8 se presenta una comparación de las principales características de los simuladores híbridos mencionados en el capítulo dos.

Tabla 8

Características de los simuladores híbridos.

Propiedades	TRANS	VEINS	MOVE
Distribución	Libre	Libre	Libre
Compatibilidad con simuladores vehicular y redes	SUMO y NS-2	SUMO, OMNET++	SUMO y NS-2
Modelos de movilidad	Rutas aleatorias y manuales	Aleatorio y manual de rutas	Rutas aleatorias y manuales
Tipo de simulación	Microscópico	Microscópico	Microscópico
Modelo de tráfico vehicular	Seguimiento de vehículos y asignación de tráfico	Seguimiento de vehículos y asignación de tráfico	Seguimiento de vehículos y asignación de tráfico
Topología de la carretera	Cualquier	Cualquier	Cualquier
Configuración	Moderado	Moderado	Fácil
Consumo recursos de memoria	Alto	Alto	Moderado
Soporte de mapas	TIGER y OpenStreetMap	TIGER y OpenStreetMap	TIGER y OpenStreetMap
GUI	SI	SI	SI

Al haber ya considerado los softwares que se emplearan para el flujo vehicular y el tráfico de red, se debe seleccionar un simulador híbrido que sea compatible con SUMO y NS-2. Por lo tanto, considerando esto y según la Tabla 8, se opta por el simulador MOVE ya que, a más

de su fácil configuración, muestra un menor consumo de memoria del computador por lo que se emplea esta herramienta para realizar la integración de los softwares SUMO y NS-2 en las simulaciones.

Modelo de Movilidad

Para la simulación de los escenarios propuestos en este trabajo se empleará dos modelos de movilidad: uno basado en un simulador de tráfico vehicular y otro en base a un modelo sintético.

Modelo Sintético

En la Tabla 9 se presenta una comparación de las principales características de estos modelos sintéticos mencionados en el capítulo dos.

Tabla 9

Características de los modelos de movilidad sintéticos.

Características	RWP	RWM	Manhattan
Confiabilidad de resultados	Bajo	Bajo	Medio
Rutas	Aleatorias	Aleatorias	Semialeatorias, permiten establecer el inicio y fin de la ruta
Topología del entorno	Aleatorio	Aleatorio	Malla
Velocidad de los nodos	Aleatoria uniforme	Aleatoria uniforme	Depende del nodo que lo precede en el mismo carril

Según la Tabla 9 y considerando la estructura de la zona urbana propuesta, se determina que el modelo de Manhattan es el que mejor se ajusta al entorno de la Plaza Góngora. Por lo tanto, en las simulaciones de los escenarios propuestos se asignará los valores por defecto que se establecen para este modelo.

Modelos Generador de Tráfico Vehicular

En la Tabla 10 se presentan las principales características de los modelos de movilidad basados en un simulador de tráfico vehicular mencionados en el capítulo dos.

Tabla 10

Características de los modelos de movilidad basados en un generador de tráfico vehicular.

Características	Krauss	Kerner	IDM
Tipo	Microscópico	Macroscópico	Microscópico
Confiabilidad de resultados	Medio	Bajo	Medio
Topología del entorno	Malla	Aleatorio	Aleatorio
Velocidad de los nodos	Dependen del nodo predecesor	Aleatoria uniforme	Depende del nodo predecesor (mismo carril)

Según la Tabla 10 y considerando que SUMO integra entre sus herramientas varios modelos de movilidad como el de Krauss se determina que este modelo es el más óptimo para ser empleado las simulaciones.

Modelo de Propagación

Existen diferentes tipos de modelos de propagación que se utilizan de acuerdo al entorno en que se genera la transmisión de datos y que influyen en los parámetros de las comunicaciones inalámbricas. Además, como el presente trabajo no está enfocado a estudiar los factores que influyen en la reflexión y difracción de la señal transmitida, se aplicará, por lo tanto, el modelo de propagación Nakagami, ya que en comparación con otros modelos como el de espacio libre y TwoRayGround, este tiene más parámetros configurables que permiten una representación más realista del canal de comunicación inalámbrica para entornos urbanos.

Protocolo de Enrutamiento

En la Tabla 11 presenta una comparación de las principales características de los protocolos de enrutamiento mencionados en el capítulo dos.

Tabla 11

Comparación de los protocolos de enrutamiento.

Propiedades	DSDV	OLSR	DSR	AODV
Soporte de enlace unidireccional	NO	SI	SI	NO
Multidifusión	NO	SI	NO	SI
Difusión Periódica	SI	SI	NO	SI
Mantenimiento de ruta	Tabla de ruta	Tabla de ruta	Tabla de ruta	Tabla de ruta
Reactivo	NO	NO	SI	SI
QoS	NO	SI	NO	NO

Según la Table 11 se concluye que el protocolo de enrutamiento que mejores características presenta es AODV, por lo que se empleará este protocolo para las simulaciones.

Parámetros a Evaluar

Para analizar el impacto que tiene la densidad vehicular se la realiza en base a cuatro parámetros cuantitativos: Throughput, Average End to End Delay, Packet Delivery Ratio y Jitter, por ser los más empleados en estudios similares y suficientes para observar el comportamiento de la comunicación V2V en los escenarios propuestos.

Throughput

Es el número total de bits transmitidos correctamente al destino durante la simulación, es decir, mide la tasa de transmisión de datos, la cual permite estimar la efectividad en la comunicación V2V. Valores altos de throughput indican que la red presenta un buen

rendimiento, por lo contrario, valores bajos indican que se han generado pocas transmisiones en el intervalo de tiempo asignado. La Ecuación 7 se emplea para calcular este parámetro.

$$TH = \frac{B_r \times 8}{T_s \times 1000} [Kbps] \quad (7)$$

En donde:

TH : Throughput.

B_r : Bytes recibidos.

T_s : Tiempo de simulación.

Packet Delivery Ratio

Es el resultado de la relación entre el número de paquetes recibidos y enviados. Este parámetro es un buen indicador para relacionar las tasas de pérdidas de los protocolos, si son altas dicho protocolo no es satisfactorio ya que los rendimientos de red empeoran. La Ecuación 8 permite calcular este parámetro el cual se multiplica por 100 para medir la eficiencia del protocolo en un tanto por ciento.

$$PDR = \frac{P_r}{P_s} \times 100\% \quad (8)$$

Donde:

PDR : Relación de entrega de paquetes.

P_r : Paquetes recibidos.

P_s : Paquetes enviados.

Average End to End Delay

Este parámetro hace referencia al retardo global en el tiempo que sufren los paquetes mientras se desplazan de la fuente al destino a través de la red y es la suma de todos los retardos que incluye el retardo de procesamiento, los retardos de cola, los retardos de propagación y los retardos de procesamiento del sistema. Además, este parámetro es de suma importancia, ya que valores altos del mismo afectan en el rendimiento de la red por lo que es necesario siempre reducirlo al mínimo. La Ecuación 9 se emplea para calcular este parámetro.

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Tr_i - Ts_i) \times 100 [ms] \quad (9)$$

Donde:

D : Average end to end delay.

i : Identificador de paquete.

n : Número de paquetes entregados exitosamente.

Tr_i : Tiempo de recepción.

Ts_i : Tiempo de envío.

Jitter

Este parámetro es importante en muchas aplicaciones de VANET. Se define como el promedio de la variación de la demora entre dos paquetes consecutivos recibidos en el destino. Por otra parte, el jitter de un vehículo se define como la media de los jitters de los paquetes transmitidos a los vehículos vecinos (Lakas, Fekair, Korichi, & Lagraa, 2019). Se calcula usando la Ecuación 10:

$$J(u) = \frac{\sum_{v \in N(u)} J(u, v)}{\text{card}(N(u))} \quad (10)$$

Donde:

$\text{card}(N(u))$: Es el número de vehículos vecinos.

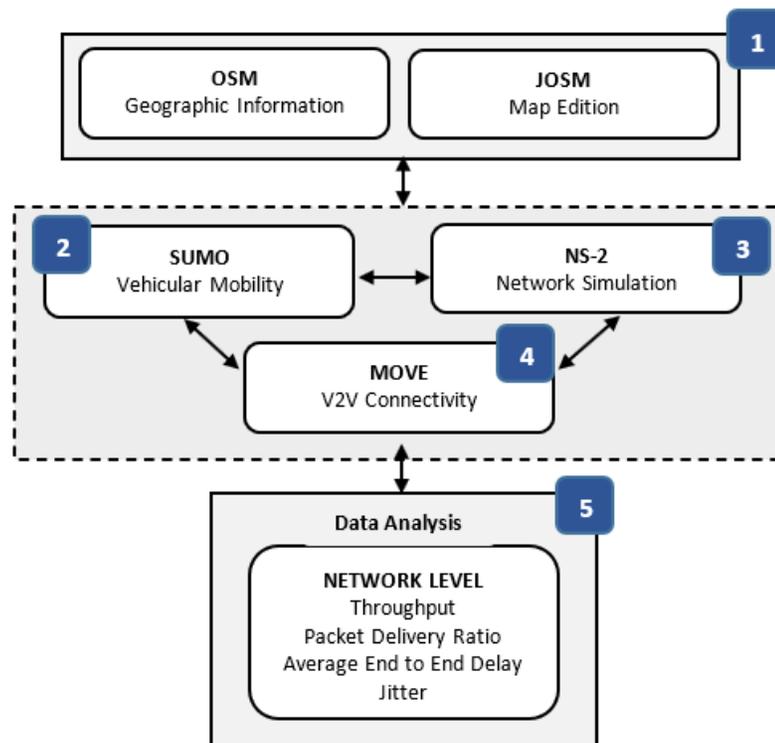
$J(u, v)$: Es el jitter entre los vehículos u y v .

Interacción e Integración de los Softwares

Como se explicó en el capítulo dos, para la integración entre el simulador de movilidad SUMO y el simulador de red NS-2 se lo realiza aplicando el enfoque federado, así la Figura 17 ilustra este esquema aplicado a este trabajo.

Figura 17

Esquema de la integración de los simuladores.

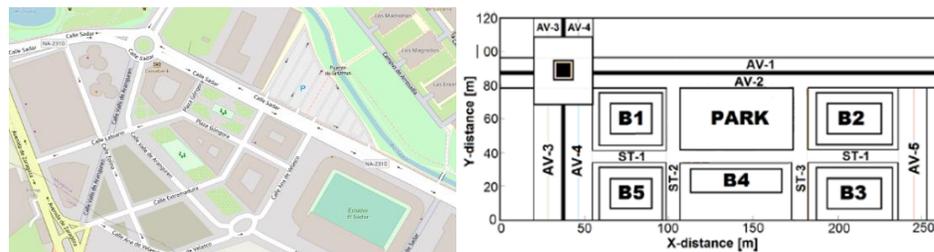


En la etapa 1, la información geográfica del escenario urbano se obtiene y exporta desde OSM, cuyo sistema de coordenadas WGS (World Geodetic System) necesita ser preprocesado para ser compatible con SUMO, que necesita coordenadas cartesianas (metros). La información geográfica de OSM se edita en JOSM donde se elimina la información de georreferencia inútil, las rutas y lugares no relevantes y se configuran algunos parámetros como el número de carril, el tipo de carril, la dirección del carril y las traslaciones de los ejes útiles para la compatibilidad con SUMO y NS-2.

En la Figura 18 se muestra el mapa del escenario urbano descargado de OSM y modelado en JOSM.

Figura 18

Mapa de la Plaza Góngora descargado de OSM y modelado en JOSM.



En la etapa 2, como se mencionó anteriormente se simula el movimiento de los vehículos en base al modelo de movilidad Krauss (modelo predeterminado en SUMO) y la parametrización de la densidad previamente definida. Además, parámetros como las rutas de los vehículos, el tipo de vehículo, la velocidad máxima, la posición inicial y final, el carril de salida y de llegada, la hora de inicio y de finalización, los vehículos por hora, los parámetros de los semáforos, etc., se configuran aquí para obtener los escenarios vehiculares de baja, media y alta densidad.

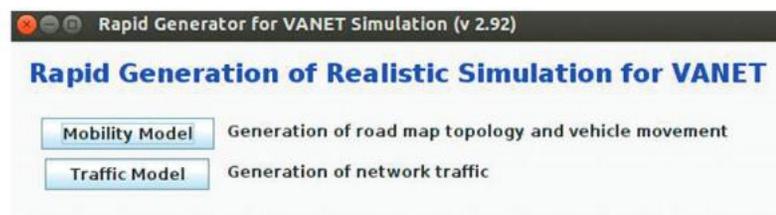
En la etapa 3, a través del lenguaje de programación C ++ y haciendo uso de los scripts TCL que incorpora el simulador de red NS-2 se programan los parámetros empleados para la simulación como el protocolo MAC: 802.11p, el protocolo de enrutamiento AODV, los protocolos de comunicación de datos TCP y UDP, el modelo de propagación Nakagami, el canal inalámbrico, la comunicación V2V, el número de nodos, el rango de transmisión y el tipo de antena.

En la etapa 4, se establece el middleware a través del software MOVE. El cual presenta dos opciones: un modelo de movilidad y un modelo de tráfico de red como se observa en la Figura 19. Además, como se mencionó anteriormente esta herramienta trabaja directamente con los softwares SUMO para la movilidad de los nodos y con NS-2 para las comunicaciones entre los mismos.

Por lo tanto, para simular la movilidad vehicular y observarlo en un mapa real, se realiza lo siguiente:

Figura 19

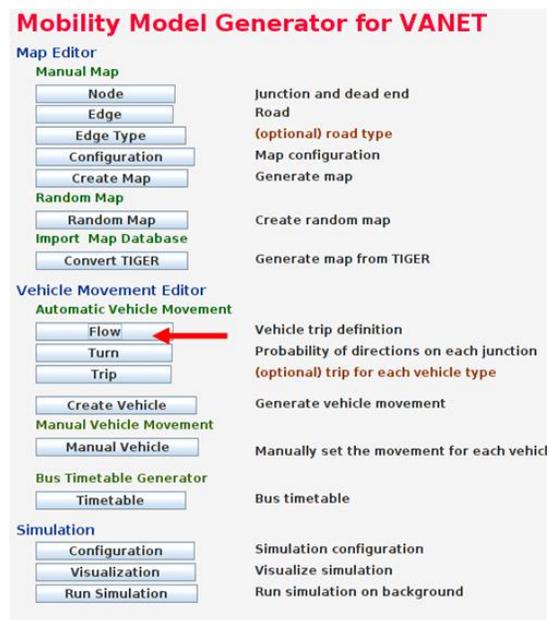
Pantalla principal de MOVE.



En el menú inicial se elige la opción Mobility Model y a continuación se selecciona la opción *Flow*, como se observa de la Figura 20.

Figura 20

Selección de la opción Flow en MOVE.



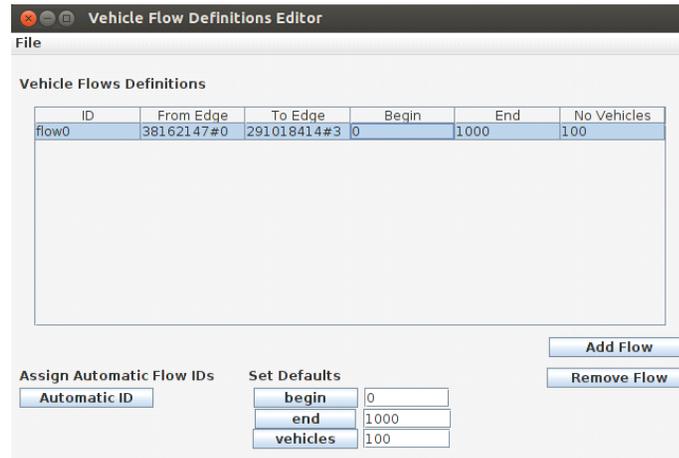
Con la opción anterior se genera una ventana como la de la Figura 21 donde se debe completar lo siguiente:

- ID: Identificador del flujo.
- From Edge: Vía desde donde inician los vehículos.
- To Edge: Fin de la vía de los vehículos.
- Begin: Inicio del flujo vehicular.
- End: Final del flujo vehicular.
- No Vehicles: Total de vehículos que forman el flujo.

Posteriormente se seleccionan las rutas del flujo vehicular en SUMO y luego se las configuran en MOVE, es decir desde donde parten hasta donde se desplazan los vehículos. La configuración de estos campos se observa en la Figura 21.

Figura 21

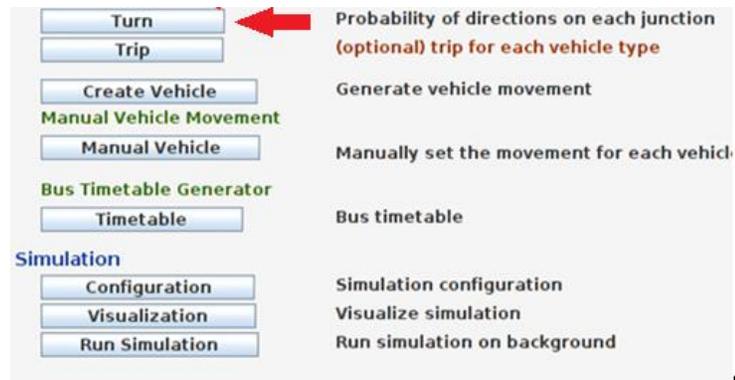
Configuración del flujo vehicular.



Completada la tabla de la Figura 21, se genera un archivo con la extensión *.flow*. Después de esto se selecciona la opción *Turn* como se observa en la Figura 22, la cual permite configurar el flujo vehicular (giros) seleccionando las vías de las intersecciones que tomarán los vehículos para arribar a su destino.

Figura 22

Selección de la opción Turn en MOVE.

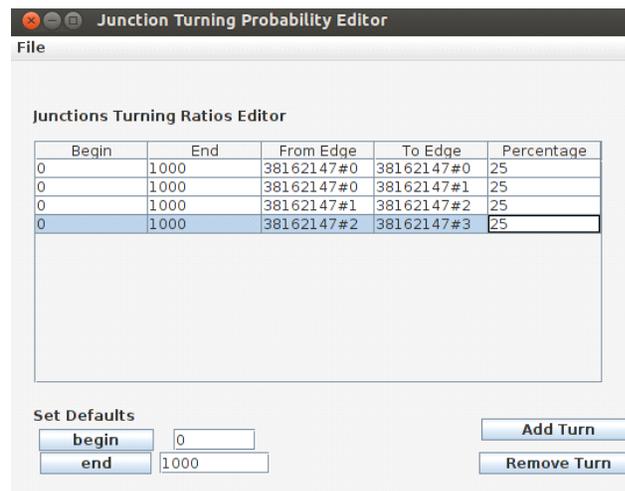


Con la opción anterior se genera una tabla como la mostrada en la Figura 23 donde se configura cada intersección en el trayecto del flujo vehicular definido anteriormente, para esto, se procede a completar la tabla con los siguientes parámetros:

- Begin: Inicio del tiempo de simulación.
- End: Fin del tiempo de simulación.
- From Edge: Vía antes del cruce.
- To Edge: Vía después del cruce.
- Porcentaje: Probabilidad de giro.

Figura 23

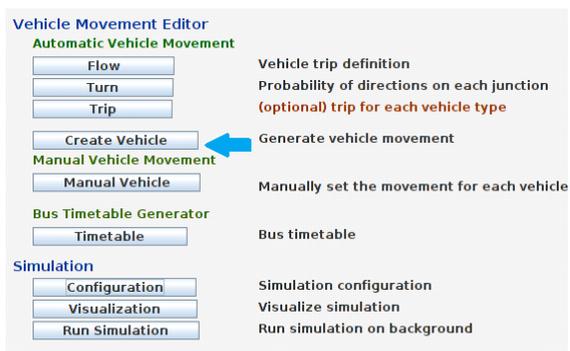
Configuración de la probabilidad de giro.



Una vez completada la tabla de la figura anterior, se procede a guardar esta configuración en un archivo con extensión *.turn*. Luego para generar el modelo de movilidad seleccionamos la opción *Create Vehicle*, como se puede ilustrar en la Figura 24.

Figura 24

Selección de la opción *Create Vehicle* en *MOVE*.



Esta generación del modelo de movilidad permite obtener el movimiento de los vehículos, para eso se emplea los archivos generados en las anteriores configuraciones (.net.xml, .flow, .turn). Posteriormente se procede con la configuración del generador automático de rutas como se ilustra en la Figura 25.

Figura 25

Generador automático de rutas.

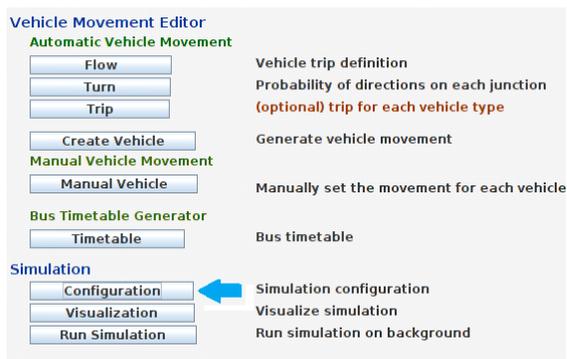


En la ventana de la figura anterior se observa la carga de estos archivos, para luego obtener un mensaje de *success* que indica que las rutas se han generado correctamente, con lo que se obtiene un archivo con la extensión *.rou.xml*

Posteriormente, para la generación del modelo de movilidad se selecciona la opción *Configuration* como se observar en la Figura 26.

Figura 26

Selección de la opción Configuration en MOVE.



Posteriormente, en la ventana mostrada en la Figura 27 se procede a cargar los archivos solicitados como son el mapa y las rutas, para luego obtener un archivo con la extensión *.sumo.cfg*

Figura 27

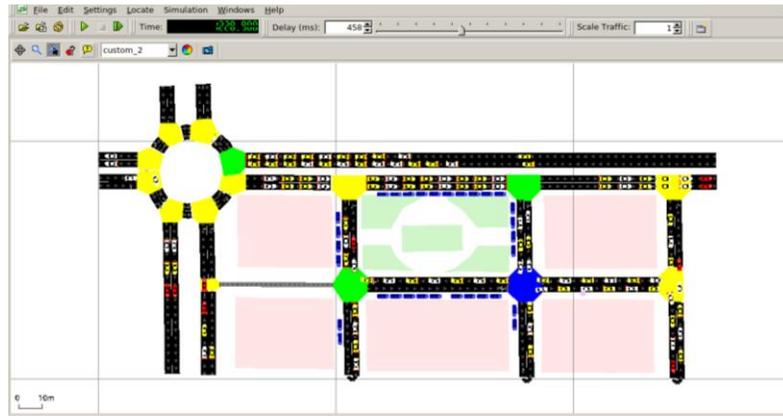
Configuración del simulador de tráfico.



Una vez cargados los archivos solicitados se genera un nuevo archivo con la extensión *.sumo.tr* el cual se carga en SUMO para la visualización del modelo de movilidad, tal como se ilustra en la Figura 28.

Figura 28

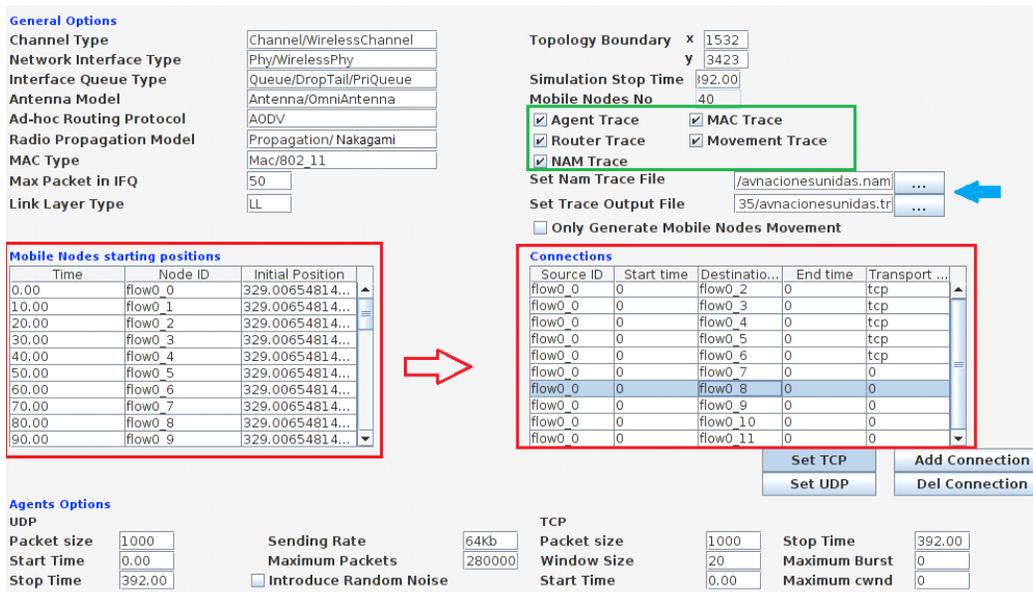
Simulación del modelo de movilidad en SUMO.



En cuanto al generador de tráfico de red en MOVE, éste presenta varias opciones de configuración para el simulador NS-2 como se observa en la Figura 29 en el cual se realizarán varias configuraciones.

Figura 29

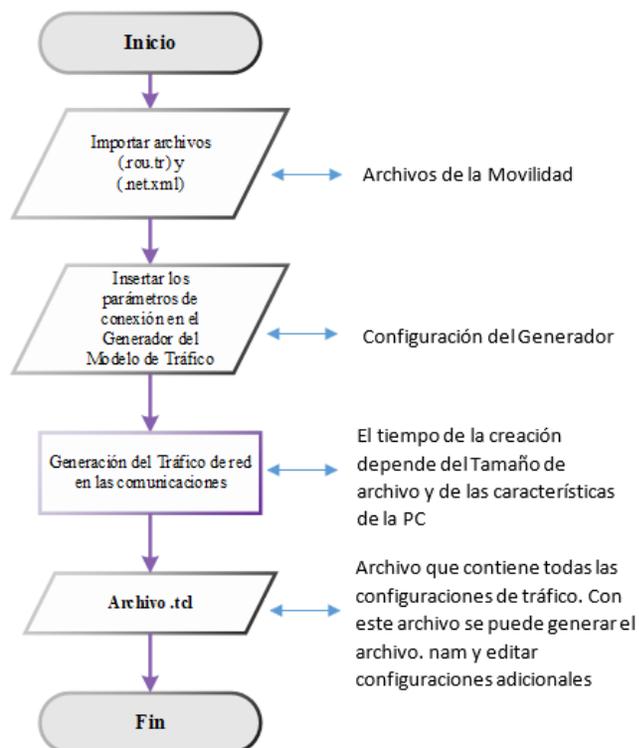
Generador del tráfico de red.



En la Figura 30 se ilustra el diagrama de flujo para la generación del tráfico de red en base a las configuraciones del simulador NS-2 en MOVE.

Figura 30

Diagrama de flujo para la generación de tráfico de red.



Finalmente, para la creación del archivo *.tdl* se realiza la configuración de las conexiones entre los vehículos en la parte inferior derecha de la venta mostrada en la Figura 29. Adicionalmente se guarda la ruta donde se almacena el archivo de extensión *.nam* que guarda las trazas de la movilidad y el archivo *.tr* que contiene todas las comunicaciones de los nodos con las opciones *Set Nam Trace File* y *Set Trace Output File* respectivamente

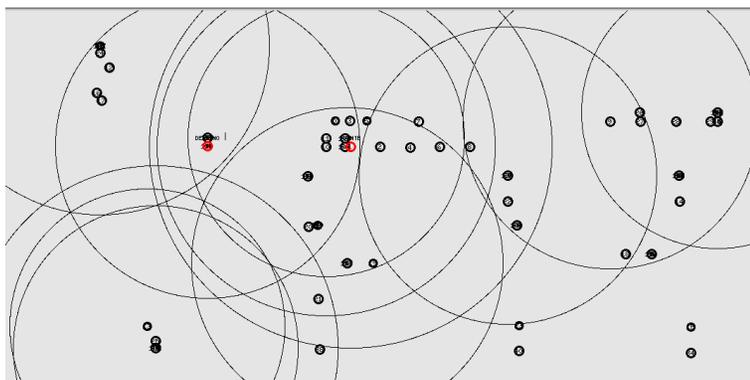
En resumen, los mapas y rutas creadas previamente (*.net.xml* y *rou.xml*) se transfieren a MOVE para generar el archivo con extensión *.sumo.cfg*, el cual contiene información necesaria para que SUMO realice la simulación. Luego esta simulación da como resultado el archivo con

extensión *.move.trace* el cual contiene los datos referentes a lo movilidad de los vehículos que NS-2 necesita para crear los movimientos de los nodos.

En base a esto se obtiene el archivo con la extensión *.tcl* el cual es un script configurable que se encarga de realizar las simulaciones, filtra la información que no interesa (paquetes o datagramas) y genera los archivos de información denominados trazas (extensión *.ns.tr*). Además, este archivo permite generar la simulación gráfica en NAM. En la Figura 31 se observa la simulación de tráfico de red con el software NS-2.

Figura 31

Simulación del tráfico de red en NS-2.



Finalmente, en la etapa 5 se realiza la medición de los parámetros de comunicación en los escenarios propuestos en este trabajo. Para estas mediciones se emplea el software Visual Trace Analyzer (Rocha, 2010) que es un software ejecutable libre de licencia, el cual permite obtener los datos de los parámetros de transmisión y analizar el comportamiento de los flujos en las simulaciones de una manera sencilla. Además, este software cuenta con una interfaz fácil de usar, es independiente y no necesita de bibliotecas externas ni instalación para utilizarla. Para el presente trabajo se ejecutará la versión 0.2.72 para Windows.

Capítulo IV

Pruebas y Resultados

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos de las simulaciones en función a la densidad vehicular.

Parámetros de Simulación

En la Tabla 12 se muestran los parámetros utilizados para las simulaciones de los escenarios propuestos en este trabajo.

Tabla 12

Parámetros de simulación.

Parámetros	Valor
Tipo de canal	Wireless channel
Tipo de interfaz de red	Wireless physical
Modelo de propagación	Nakagami (m=3.0)
Protocolo MAC	IEEE 802.11p
Tipo de capa de enlace	LL (Link Layer)
Tipo de buffer	Queue/DropTail/PriQueue
Tiempo de simulación	50 s
Frecuencia de operación	5.9 GHz
Tamaño paquetes	512 bytes
Rango de transmisión	250 m
Velocidad máxima	50 Km/h
Tasa de paquetes	1Mb/s
Tipo de tráfico	UDP/TCP
Número de nodos	80, 135, 215
Protocolo de enrutamiento	AODV
Antena	Omnidireccional (1.5 m)
Sensibilidad de la antena	-70 dBi
Potencia de transmisión	100 mW

Evaluación y Análisis de Desempeño

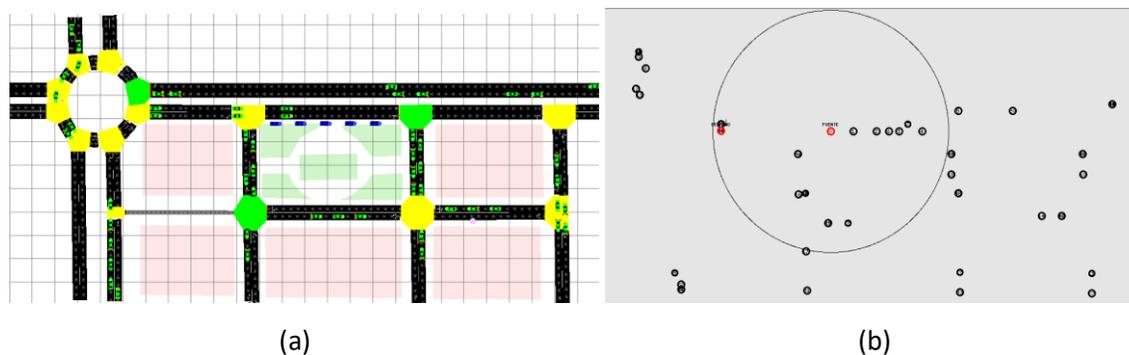
Para analizar el impacto que tiene la densidad vehicular en los parámetros de comunicación, se ha considerado una comunicación entre un auto parqueado y un auto en movimiento que representan la conexión V2V dentro de la red VANET. Tomando como base este tipo de conexión y variando el número de nodos en cada escenario se analizan y comparan los resultados obtenidos en los parámetros de transmisión.

Simulación del Escenario 1

En la Figura 32 se ilustra el escenario simulado en SUMO y en NS-2 para una baja densidad vehicular, el cual consta de 80 vehículos distribuidos en toda la zona urbana seleccionada.

Figura 32

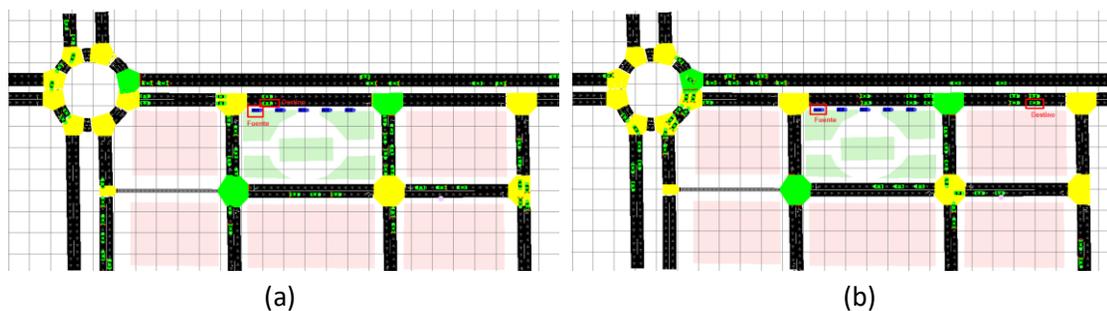
Simulación en SUMO (a) y NS-2 (b): baja densidad.



Por otra parte, en la Figura 33 se ilustra el desplazamiento de los vehículos seleccionados como nodo fuente y nodo destino a partir de los 50 segundos hasta los 100 segundos de simulación.

Figura 33

Posición de los nodos fuente y destino a los $t=50s$ (a) y $t=100s$ (b): baja densidad.



Dentro del escenario 1 se realizaron varias simulaciones en las cuales se evaluaron distintos casos.

Caso 1. Se simula en base a los siguientes parámetros:

- Modelo de propagación: Nakagami ($m=3.0$)
- Número de nodos: 80
- Número de conexiones: 1
- Protocolo de comunicación: UDP

Los resultados obtenidos en los parámetros de transmisión para este caso son:

Tabla 13

Parámetros de transmisión para el escenario de baja densidad: caso 1.

Tiempo (s)	Vehículos Cercanos	Packet Delivery Ratio (%)	Throughput (Kbps)	Delay (s)	Jitter (s)
0	6	94.81	120	0.006	1.54E-04
10	11	96.13	121	0.005	1.13E-04
20	13	96.90	119	0.004	9.07E-05

Tiempo (s)	Vehículos Cercanos	Packet Delivery Ratio (%)	Throughput (Kbps)	Delay (s)	Jitter (s)
30	12	97.41	121	0.004	7.87E-05
40	13	97.78	119	0.003	9.26E-05
50	15	98.06	121	0.003	1.56E-04

Nota. La columna Vehículos Cercanos hace referencia al número de vehículos que circulan alrededor del vehículo parqueado (nodo fuente) y del vehículo en movimiento (nodo destino) en el instante que estos comienzan a transmitir información.

Según la Tabla 13, se observa que al emplear el protocolo reactivo AODV y un tráfico UDP existe un 96 % de efectividad en el porcentaje de PDR lo que significa que el rendimiento de la red es bueno.

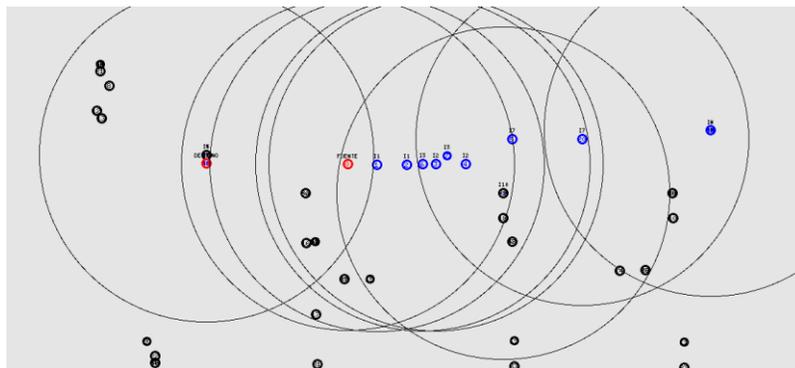
Caso 2. Se simula en base a los siguientes parámetros:

- Modelo de propagación: Nakagami ($m=3.0$)
- Número de nodos: 80
- Número de conexiones: 11 (1 principal y 10 interferencias)
- Protocolo de comunicación: UDP

Además, en la Figura 34 se ilustra la conexión de los nodos principales (color rojo) y los nodos interferentes (color azul) simulados en NS-2 para este caso.

Figura 34

Simulación en NS-2 del caso 2: baja densidad.



Los resultados obtenidos en los parámetros de transmisión para este caso son:

Tabla 14

Parámetros de transmisión para el escenario de baja densidad: caso 2.

Tiempo (s)	Vehículos Cercanos	Conexiones Interferentes	Packet Delivery Ratio (%)	Throughput (Kbps)	Delay (s)	Jitter (s)
0	6	4	6.63	81	0.132	0.008
10	11	6	5.41	18	0.332	0.017
20	13	9	3.80	10	0.105	0.011
30	12	9	3.60	6	1.304	0.029
40	13	9	3.09	6	0.451	0.021
50	15	10	2.66	4	1.078	0.028

Nota. La columna Conexiones Interferentes hace referencia al número de conexiones que se van generando alrededor de la conexión principal V2V. Estas conexiones varían durante el tiempo de simulación y tienen periodos cortos de transmisión puesto que únicamente establecen comunicación cuando se encuentran cerca de los nodos fuente y destino.

Según la Tabla 14, se observa que los valores en los parámetros de transmisión en comparación con el caso 1 se reducen drásticamente, esto se produce debido a la existencia de nodos interferentes y al escaso número de rutas producto de la baja cantidad de nodos.

Caso 3. Se simula en base a los siguientes parámetros:

- Modelo de propagación: Nakagami (m=3.0)
- Número de nodos: 80
- Número de conexiones: 1
- Protocolo de comunicación: TCP

Los resultados obtenidos en los parámetros de transmisión para este caso son:

Tabla 15

Parámetros de transmisión para el escenario de baja densidad: caso 3.

Tiempo (s)	Vehículos Cercanos	Packet Delivery Ratio (%)	Throughput (Kbps)	Delay (s)	Jitter (s)
0	6	97.44	168	0.131	0.0769
10	11	99.75	295	0.048	0.0134
20	13	99.87	307	0.045	0.0102
30	12	99.91	309	0.046	0.0093
40	13	99.88	302	0.055	0.0097
50	15	99.90	274	0.072	0.0103

Según la Tabla 15, se observa que existe un 99% de efectividad en el porcentaje de PDR, además, en este caso al emplear tráfico TCP la red presenta un mejor throughput que UDP, esto se produce debido a que TCP al ser orientado a conexión posee una tasa de pérdidas menor.

Caso 4. Se simula en base a los siguientes parámetros:

- Modelo de propagación: Nakagami ($m=3.0$)
- Número de nodos: 80
- Número de conexiones: 11 (1 principal y 10 interferencias)
- Protocolo de comunicación: TCP

Los resultados obtenidos en los parámetros de transmisión para este caso son:

Tabla 16

Parámetros de transmisión para el escenario de baja densidad: caso 4.

Tiempo (s)	Vehículos Cercanos	Conexiones Interferentes	Packet Delivery Ratio (%)	Throughput (Kbps)	Delay (s)	Jitter (s)
0	6	4	94.92	48	0.181	0.048
10	11	6	85.42	11	1.269	0.525
20	13	9	85.29	6	0.257	0.189
30	12	9	82.22	6	0.239	0.245
40	13	9	47.37	3	0.313	0.435
50	15	10	27.90	0.518	1.189	1.161

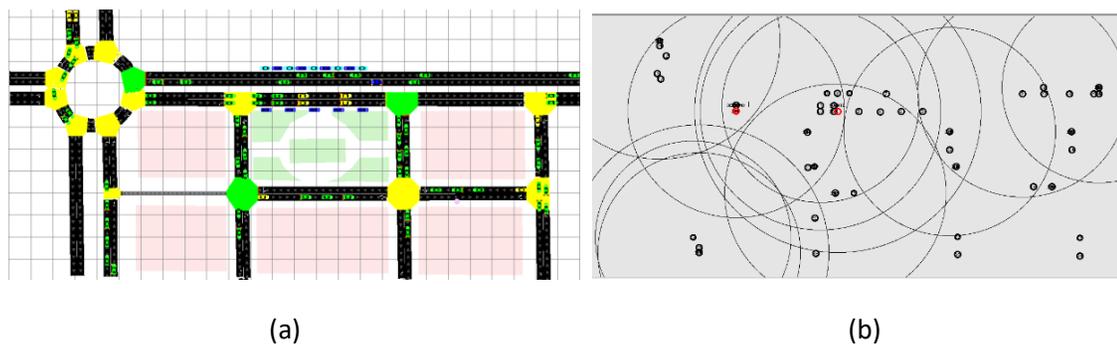
En comparación con el caso 2 y al analizar los valores de la Tabla 16, vuelve a ser notorio el impacto negativo que representa los nodos interferentes en el rendimiento de la red, pasando de valores de entre 4Kbps a 81Kbps para el caso 2 y de 0.5Kbps a 48Kbps para el caso 4.

Simulación del Escenario 2

En la Figura 35 se ilustra el escenario simulado en SUMO y en NS-2 para una media densidad vehicular, el cual consta de 135 vehículos distribuidos en toda la zona urbana seleccionada.

Figura 35

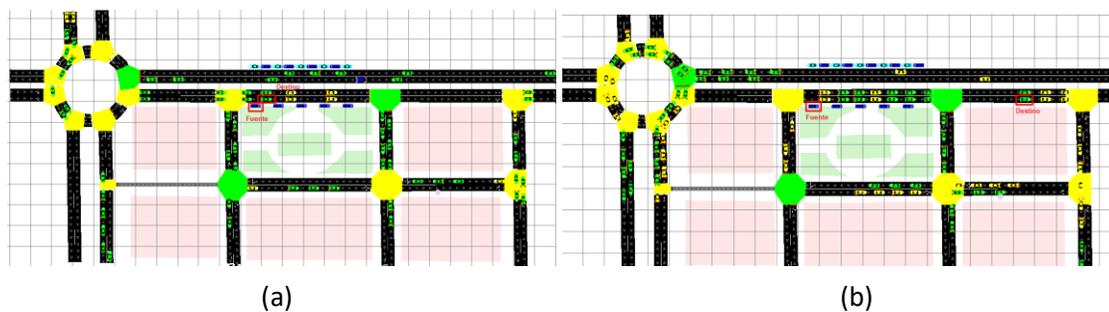
Escenario 2 simulado en SUMO y NS-2: media densidad.



Por otra parte, en la Figura 36 se ilustra el desplazamiento de los vehículos seleccionados como nodo fuente y nodo destino a partir de los 50 segundos hasta los 100 segundos de simulación.

Figura 36

Posición de los nodos fuente y destino a los $t=50s$ y $t=100s$: media densidad.



Dentro del escenario 2 también se realizaron varias simulaciones en las cuales se evaluaron distintos casos.

Caso 1. Se simula en base a los siguientes parámetros:

- Modelo de propagación: Nakagami ($m=3.0$)

- Número de nodos: 135
- Número de conexiones: 1
- Protocolo de comunicación: UDP

Los resultados obtenidos en los parámetros de transmisión para este caso son:

Tabla 17

Parámetros de transmisión para el escenario de media densidad: caso 1.

Tiempo (s)	Vehículos Cercanos	Packet Delivery Ratio (%)	Throughput (Kbps)	Delay (s)	Jitter (s)
0	19	99.98	122	0.003	2.03E-05
10	24	99.98	122	0.004	1.52E-05
20	30	99.95	119	0.003	1.24E-05
30	32	99.93	122	0.003	1.59E-05
40	33	99.91	120	0.004	3.59E-05
50	35	99.90	122	0.002	1.02E-04

Según la Tabla 17, se observa que en comparación con el caso 1 del escenario de baja densidad los valores obtenidos son ligeramente mayores aproximadamente en un 2%, esto se debe a que al aumentar la cantidad de nodos existen más rutas para la transmisión de datos.

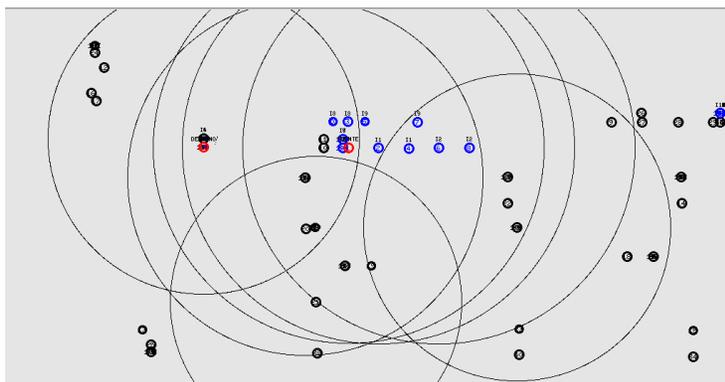
Caso 2. Se simula en base a los siguientes parámetros:

- Modelo de propagación: Nakagami ($m=3.0$)
- Número de nodos: 135
- Número de conexiones: 16 (1 principal y 15 interferencias)
- Protocolo de comunicación: UDP

Además, en la Figura 37 se ilustra la conexión de los nodos principales (color rojo) y los nodos interferentes (color azul) simulados en NS-2 para este caso.

Figura 37

Simulación en NS-2 del caso 2: media densidad.



Los resultados obtenidos en los parámetros de transmisión para este caso son:

Tabla 18

Parámetros de transmisión para el escenario de media densidad: caso 2.

Tiempo (s)	Vehículos Cercanos	Conexiones Interferentes	Packet Delivery Ratio (%)	Throughput (Kbps)	Delay (s)	Jitter (s)
0	19	10	20.21	82	0.149	0.0039
10	24	11	34.56	32	0.384	0.0074
20	30	13	25.92	28	0.245	0.0052
30	32	13	21.32	26	0.192	0.0053
40	33	14	17.96	20	0.207	0.0046
50	35	15	17.29	20	0.285	0.0071

Según la Tabla 18, se observa que al aumentar la cantidad de vehículos y el número de conexiones interferentes los valores en los parámetros de transmisión como el throughput son bajos; esto se genera debido a que existen más nodos compitiendo por el mismo medio físico y

como resultado al momento de comunicarse con otro nodo existen más colisiones y por lo tanto reintentos a la hora de acceder al medio, provocando así una disminución en el rendimiento de la red.

Caso 3. Se simula en base a los siguientes parámetros:

- Modelo de propagación: Nakagami ($m=3.0$)
- Número de nodos: 135
- Número de conexiones: 1
- Protocolo de comunicación: TCP

Los resultados obtenidos en los parámetros de transmisión para este caso son:

Tabla 19

Parámetros de transmisión para el escenario de media densidad: caso 3.

Tiempo (s)	Vehículos Cercanos	Packet Delivery Ratio (%)	Throughput (Kbps)	Delay (s)	Jitter (s)
0	19	100.00	313	0.104	0.005
10	24	99.98	314	0.092	0.006
20	30	99.97	316	0.082	0.006
30	32	99.98	316	0.077	0.007
40	33	99.76	313	0.075	0.007
50	35	99.52	296	0.078	0.008

Según la Tabla 19, se observa que al implementar el protocolo TCP al igual que en el caso 1 del escenario de baja densidad existe una buena efectividad en el porcentaje de PDR. Además, la red presenta un mejor throughput con valores que van desde los 296 a los 316 Kbps en comparación con los 274 a las 309 Kbps de baja densidad.

Caso 4. Se simula en base a los siguientes parámetros:

- Modelo de propagación: Nakagami ($m=3.0$)
- Número de nodos: 135
- Número de conexiones: 16 (1 principal y 15 interferencias)
- Protocolo de comunicación: TCP

Los resultados obtenidos en los parámetros de transmisión para este caso son:

Tabla 20

Parámetros de transmisión para el escenario de media densidad: caso 4.

Tiempo (s)	Vehículos Cercanos	Conexiones Interferentes	Packet Delivery Ratio (%)	Throughput (Kbps)	Delay (s)	Jitter (s)
0	19	10	65.38	24	0.533	0.556
10	24	11	91.53	8	0.454	0.323
20	30	13	75.16	2	0.281	0.202
30	32	13	74.53	4	0.214	0.068
40	33	14	81.08	6	0.487	0.651
50	35	15	28.57	0.293	1.667	1.892

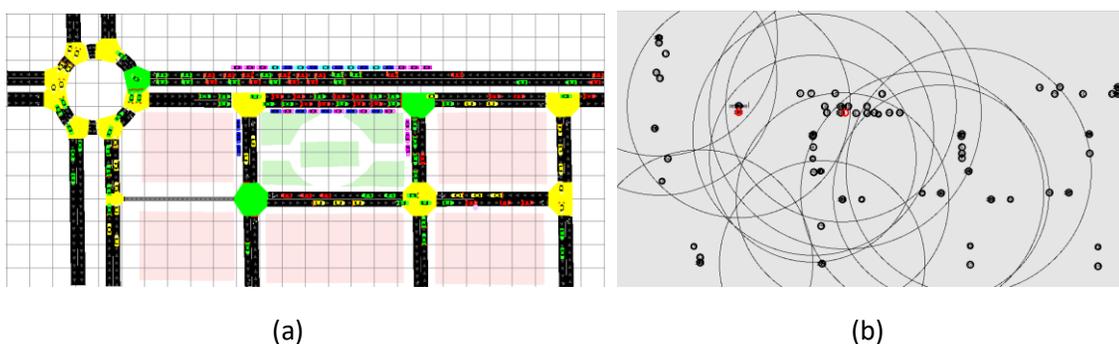
Al analizar los valores obtenidos en la Tabla 20 y comparándolos con el caso 2 de este escenario, se observa que se tiene un mejor porcentaje en la relación de entrega de paquetes al emplear el protocolo TCP, esto se genera debido a que UDP envía más paquetes de datos (datagramas) congestionando más el medio y consecuentemente hace que los receptores terminen recibiendo menos paquetes que en el caso del protocolo TCP.

Simulación del Escenario 3

En la Figura 38 se ilustra el escenario simulado en SUMO y en NS-2 para una alta densidad vehicular, el cual consta de 215 vehículos distribuidos en toda la zona urbana seleccionada.

Figura 38

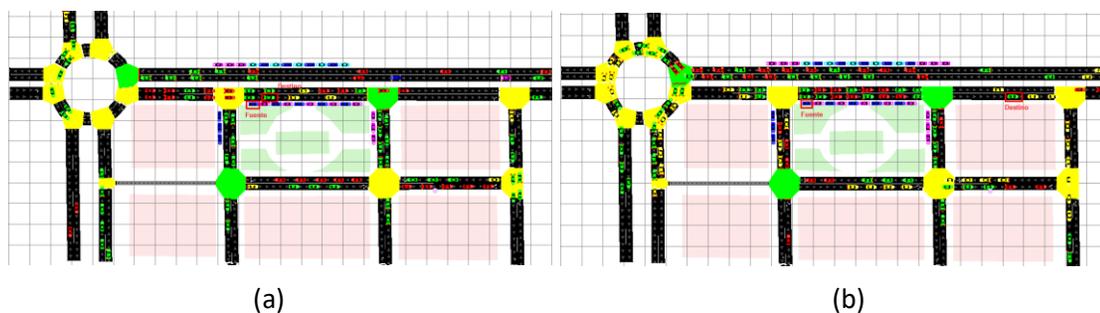
Escenario 3 simulado en SUMO y NS-2: alta densidad.



Por otra parte, en la Figura 39 se ilustra el desplazamiento de los vehículos seleccionados como nodo fuente y nodo destino a partir de los 50 segundos hasta los 100 segundos de simulación.

Figura 39

Posición de los nodos fuente y destino a los $t=50s$ y $t=100s$: alta densidad.



Dentro del escenario 3 también se realizaron varias simulaciones en las cuales se evaluaron distintos casos.

Caso 1. Se simula en base a los siguientes parámetros:

- Modelo de propagación: Nakagami ($m=3.0$)
- Número de nodos: 215
- Número de conexiones: 1
- Protocolo de comunicación: UDP

Los resultados obtenidos en los parámetros de transmisión para este caso son:

Tabla 21

Datos de los parámetros de transmisión del escenario 3: caso 1.

Tiempo (s)	Vehículos Cercanos	Packet Delivery Ratio (%)	Throughput (Kbps)	Delay (s)	Jitter (s)
0	26	99.94	122	0.001	1.16E-05
10	30	99.93	119	0.002	8.71E-06
20	32	99.89	122	0.002	8.58E-06
30	35	99.86	122	0.001	1.59E-05
40	38	99.84	120	0.003	4.77E-05
50	40	99.81	122	0.002	1.55E-04

Según la Tabla 21, se observa que al utilizar el protocolo AODV con un tráfico UDP no existe mayor pérdida de paquetes. Además, los tiempos de entrega de paquetes de extremo a extremo son ligeramente bajos en comparación con los otros escenarios, esto se genera debido a que al aumentar el número de nodos aumentan las rutas y por lo tanto las esperas en la interfaz de cola se reducen provocando que existan menos retransmisiones por el buffer durante el descubrimiento de rutas.

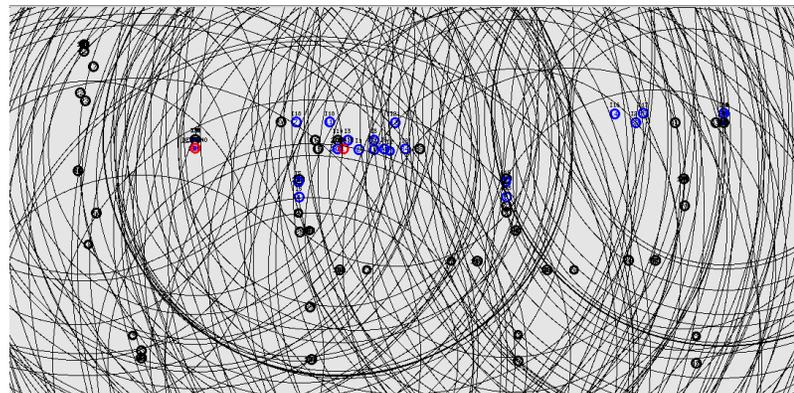
Caso 2. Se simula en base a los siguientes parámetros:

- Modelo de propagación: Nakagami ($m=3.0$)
- Número de nodos: 215
- Número de conexiones: 25 (1 principal y 24 interferencias)
- Protocolo de comunicación: UDP

En la Figura 40 se ilustra la conexión de los nodos principales (color rojo) y los nodos interferentes (color azul) simulados en NS-2 para este caso.

Figura 40

Simulación en NS-2 del caso 2: alta densidad.



Los resultados obtenidos en los parámetros de transmisión para este caso son:

Tabla 22

Datos de los parámetros de transmisión del escenario 3: caso 2.

Tiempo (s)	Vehículos Cercanos	Conexiones Interferentes	Packet Delivery Ratio (%)	Throughput (Kbps)	Delay (s)	Jitter (s)
0	26	13	50.52	71	0.161	5.6E-03
10	30	16	48.22	65	0.212	6.5E-03
20	32	18	38.74	45	0.313	8.4E-03

Tiempo (s)	Vehículos Cercanos	Conexiones Interferentes	Packet Delivery Ratio (%)	Throughput (Kbps)	Delay (s)	Jitter (s)
30	35	22	32.45	42	0.213	7.5E-03
40	38	24	27.90	42	0.234	8.6E-03
50	40	24	33.63	43	0.212	6.8E-03

Según la Tabla 22 se puede observar que al aumentar la cantidad de vehículos el rendimiento de la red mejora en comparación con los otros escenarios, sin embargo, debido también al aumento de conexiones interferentes, estos valores de throughput no son muy altos; como ya se explicó esto se genera debido a que al existir más nodos transmitiendo información estos compiten por el mismo medio físico.

Caso 3. Se simula en base a los siguientes parámetros:

- Modelo de propagación: Nakagami ($m=3.0$)
- Número de nodos: 215
- Número de conexiones: 1
- Protocolo de comunicación: TCP

Los resultados obtenidos en los parámetros de transmisión para este caso son:

Tabla 23

Datos de los parámetros de transmisión del escenario 3: caso 3.

Tiempo (s)	Vehículos Cercanos	Packet Delivery Ratio (%)	Throughput (Kbps)	Delay (s)	Jitter (s)
0	26	99.97	312	0.107	0.0067
10	30	99.98	314	0.093	0.0065
20	32	99.98	315	0.084	0.0065
30	35	99.98	316	0.078	0.0066
40	38	99.76	308	0.082	0.0073
50	40	99.50	284	0.088	0.0080

Según la Tabla 23, se puede observar un mejor Throughput con el protocolo TCP que con UDP. Obteniendo una variación de hasta 190 Kbps en el mejor de los casos.

Caso 4. Se simula en base a los siguientes parámetros:

- Modelo de propagación: Nakagami ($m=3.0$)
- Número de nodos: 215
- Número de conexiones: 25 (1 principal y 24 interferencias)
- Protocolo de comunicación: TCP

Los resultados obtenidos en los parámetros de transmisión para este caso son:

Tabla 24

Datos de los parámetros de transmisión del escenario 3: caso 4.

Tiempo (s)	Vehículos Cercanos	Conexiones Interferentes	Packet Delivery Ratio (%)	Throughput (Kbps)	Delay (s)	Jitter (s)
0	26	13	96.67	128	0.1507	0.1027
10	30	16	88.46	28	0.1861	0.1260
20	32	18	99.11	66	0.2110	0.0430
30	35	22	98.54	43	0.2281	0.0582
40	38	24	98.54	42	0.2291	0.0582
50	40	24	91.58	23	0.1903	0.0834

Según la Tabla 24 al aplicar el protocolo TCP los valores en los parámetros de transmisión en comparación con UDP mejoran. Además, en comparación con los casos 4 de los otros escenarios, al aumentar la cantidad de nodos el rendimiento de la red es mejor, sin embargo, estos valores son bajos debido a que al presentar una mayor cantidad de conexiones el medio se ve mucho más congestionado.

Comparación y Análisis de los Casos Simulados en Cada Escenario

Análisis Casos 1: UDP Sin Interferencias en Baja y Alta Densidad Vehicular. Los valores promedios de los parámetros de transmisión para los casos 1 en estos escenarios son:

Tabla 25

Datos promedios de los parámetros de transmisión para los casos 1: baja y alta densidad.

Densidad	Nodos	Packet Delivery Ratio (%)	Throughput (Kbps)	Delay (s)	Jitter (s)
Baja	80	96.85	120.17	0.0042	0.00011
Alta	215	99.88	121.17	0.0018	0.00004

Nota. Los datos fueron obtenidos bajo los siguientes parámetros: AODV, UDP, Nakagami y sin nodos interferentes.

Según la Tabla 25, se observa que a medida que el número de nodos aumenta de 125 a 215 el PDR y el Throughput presentan una mínima variación cuando se emplea el protocolo AODV esto se da ya que al ser un protocolo reactivo mantiene un throughput constante frente a variaciones de densidad vehicular, esto se ve reflejado en las gráficas de la Figura 41.

Además, se observar que para un mayor número de modos el retraso es menor a diferencia de cuando se tiene una baja densidad. Esta variación se da ya que se está aplicando un protocolo unicast el cual al presenta pocos caminos libres de bucles para llegar al destino en un escenario de baja densidad genera que los tiempos de entrega de paquetes sea más larga. Lo mismo sucede con el Jitter. La Figura 42 ilustra el comportamiento de estos parámetros.

Figura 41

PDR y Throughput en función del número de nodos: media y alta densidad.

**Figura 42**

Delay y Jitter en función del número de nodos: media y alta densidad.



Análisis casos 2: UDP Con Interferencias en Baja, Media y Alta Densidad vehicular. Los valores promedios obtenidos en los parámetros de transmisión para los casos 2 en estos escenarios son:

Tabla 26

Datos promedios de los parámetros de transmisión para los casos 2: baja, media y alta densidad.

Densidad	Nodos	Interferencias	Packet Delivery Ratio (%)	Throughput (Kbps)	Delay (s)	Jitter (s)
Baja	80	10	4.21	20.83	0.567	0.019
Media	135	15	22.88	34.67	0.244	0.0056
Alta	215	25	38.58	51.33	0.224	0.0072

Nota. Los datos fueron obtenidos bajo los siguientes parámetros: AODV, UDP, Nakagami y con nodos interferentes.

Según la Tabla 26 se observa que al aumentar la cantidad de nodos los parámetros de transmisión mejoran, sin embargo, al implementar nodos interferentes alrededor de los nodos fuente y destino, estos valores son bajos. Esto se da debido a que al emplear el protocolo UDP y al ser tráfico a tasa constante y no orientado a conexión genera que una gran cantidad de datagramas se pierdan a causa del desbordamiento de los buffers. Por otra parte, al analizar el throughput en estos casos con interferencias, este parámetro mejora al aumentar el número de vehículos, esta se da debido a que en el escenario de densidad baja el número de rutas es bajo, producto de la poca cobertura y escasos nodos que existen en este escenario.

Además, según la Tabla 26, se puede observar, que debido a la latencia generada por los nodos interferentes este presenta un mayor retardo en la entrega de paquetes para los escenarios de baja y media densidad, esto se genera debido a que el protocolo AODV para establecer una ruta envía los RREP de manera unicast hasta el nodo que realizó la petición y al contar en estos escenarios con nodos interferentes alrededor del nodo destino hace que los tiempos de propagación y transferencia de datos sean más largos en comparación con los

escenarios donde no existe interferencias. La Figura 43 y Figura 44 ilustra el comportamiento de estos parámetros.

Figura 43

PDR y Throughput en función del número de nodos: baja, media y alta densidad.



Figura 44

Delay y Jitter en función del número de nodos: baja, media y alta densidad.



Análisis casos 3: TCP Sin Interferencias en Baja y Alta Densidad Vehicular. Los valores promedios obtenidos en los parámetros de transmisión para los casos 3 son:

Tabla 27

Datos promedios de los parámetros de transmisión para los casos 3: baja y alta densidad.

Densidad	Nodos	Packet Delivery Ratio (%)	Throughput (Kbps)	Delay (s)	Jitter (s)
Baja	80	99.46	275.83	0.0661	0.0216
Alta	215	99.86	308.17	0.0886	0.0069

Nota. Los datos fueron obtenidos bajo los siguientes parámetros: AODV, TCP, Nakagami y sin nodos interferentes.

Según la Tabla 27, se observa en términos generales que los parámetros de transmisión mejoran al emplear el protocolo TCP frente a UDP, esto se da debido a que TCP al ser orientado a la conexión posee una tasa de pérdidas menor. Por otra parte, al aumentar la cantidad de nodos hace que la velocidad promedio de los vehículos sea más lenta generan una topología de la red más estable y, por lo tanto, un mejor rendimiento de esta. La Figura 45 y Figura 46 ilustran el comportamiento de estos parámetros.

Figura 45

PDR y Throughput en función del número de nodos: baja y alta densidad.

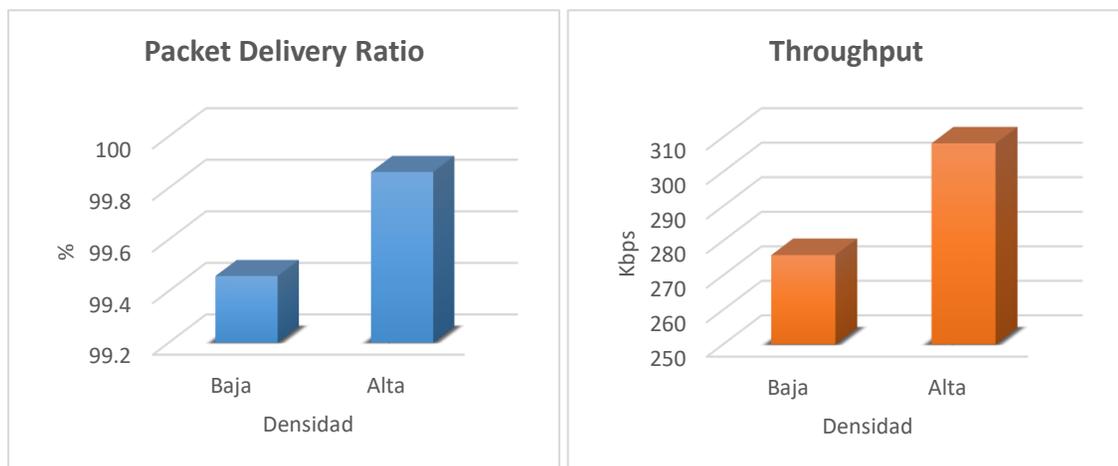
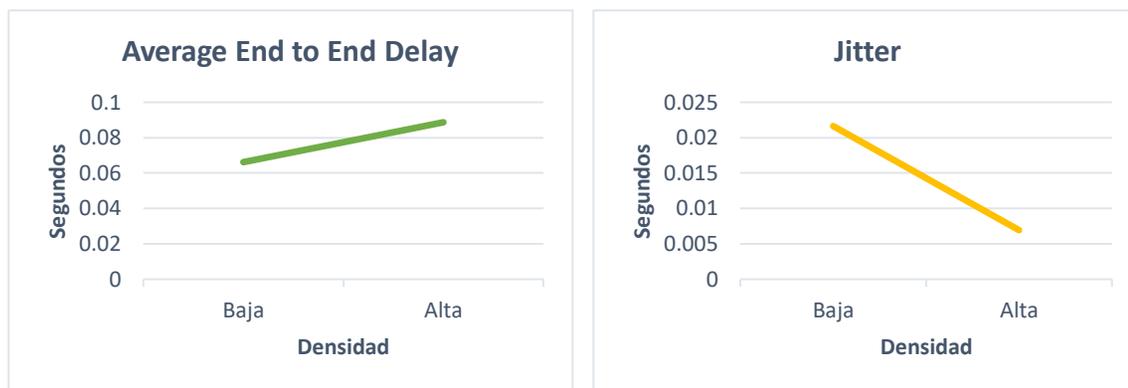


Figura 46

Delay y Jitter en función del número de nodos: baja y alta densidad.



Análisis Casos 4: TCP Con Interferencias en Baja y Alta Densidad Vehicular. Los valores promedios obtenidos en los parámetros de transmisión para los casos 4 en estos escenarios son:

Tabla 28

Datos promedios de los parámetros de transmisión para los casos 4: baja y alta densidad.

Densidad	Nodos	Interferencias	Packet Delivery Ratio (%)	Throughput (Kbps)	Delay (s)	Jitter (s)
Baja	80	10	70.52	12.42	0.574	0.434
Alta	215	25	95.48	55	0.199	0.079

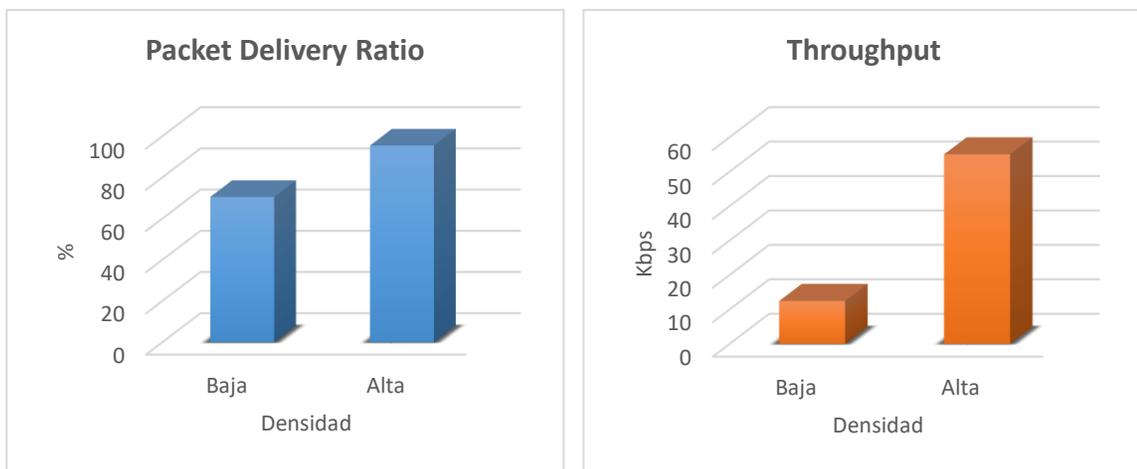
Nota. Los resultados fueron obtenidos bajo los siguientes parámetros: AODV, TCP, Nakagami y con nodos interferentes.

Según la Tabla 28, se puede observar que los parámetros de transmisión mejoran al aumentar la cantidad de nodos, sin embargo, estos valores se ven afectados por la presencia de nodos interferentes, esto se da debido que al existir una cantidad mayor de nodos las rutas suelen tener varios saltos, y cuantos más saltos tengan las rutas, mayor es la probabilidad de

que alguno se vea afectado por el tráfico interferente, que también cuenta con rutas y con más saltos, por tanto, el número de paquetes perdidos aumenta y en consecuencia se reciben menos paquetes en el destino. Por otra parte, al analizar el Throughput y comparándolo con los casos de UDP con interferencias podemos notar que es mejor, esto se debe a que UDP al enviar más paquetes congestiona más el medio y consecuentemente los receptores acaban recibiendo menos paquetes que en el caso de TCP. La Figura 47 ilustra el comportamiento de estos parámetros.

Figura 47

PDR y Throughput en función del número de nodos: baja y alta densidad.

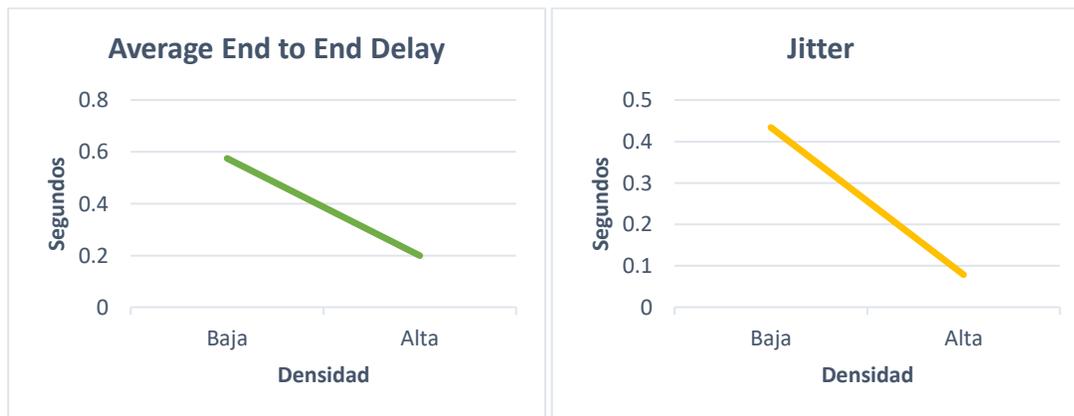


Por otra parte, en cuanto a la latencia se puede observar que se tiene un mayor retardo en la entrega de paquetes en el escenario de baja densidad, esto se genera debido a la manera en cómo se envían los RREP. Además, como se puede observar en la Tabla 28 cuando se tiene una baja densidad el tiempo de retardo es alto, sin embargo, para una densidad alta éste disminuye, esto se da debido a que existe un mayor número de rutas. Sin embargo, debido a

que el número de conexión interferentes es mayor en el escenario de densidad alta, los valores de este parámetro son altos en comparación con los escenarios sin interferencias.

Figura 48

Delay y Jitter en función del número de nodos: baja, media y alta densidad.



Capítulo V

Conclusiones y Trabajos Futuros

Este tema de investigación tuvo como finalidad lograr simulaciones realistas para arquitecturas VANET con el propósito de analizar el impacto que representa la densidad vehicular en los parámetros de comunicación de una conexión V2V en entornos urbanos, para lo cual se han empleado herramientas de software de distribución libre como SUMO, MOVE y NS2.

Los escenarios se simularon haciendo uso de mapas georreferenciados OSM (Open Street Map) para obtener la red vial. Posteriormente la zona urbana seleccionada fue modificada con la herramienta JOSM para incorporarla en el software SUMO y así obtener la movilidad sobre redes viales urbanas con su respectivo flujo vehicular.

Dentro de las simulaciones fue posible simular la comunicación V2V en VANET con y sin interferencia alcanzando velocidades en el throughput en los casos más favorables de hasta 311 Kbps con TCP y 121 Kbps con UDP que son válidas para desarrollar un intercambio de información en este tipo de escenarios. Además, este parámetro no presentó una variación significativa cuando se trató de escenario en los cuales no existe interferencias, sin embargo, en los escenarios con presencia de nodos interferentes el throughput presentó una disminución del 6% al aumentar la cantidad de nodos y conexiones.

Por lo tanto, los resultados sugieren que a mayor densidad de nodos mejor es el rendimiento de la red ya que al existir más nodos dentro del escenario se pueden establecer más saltos de ruta mejorando así la relación de entrega de paquetes. Sin embargo, en los escenarios con nodos interferentes el throughput se ve afectado ya que al existir una mayor cantidad de nodos enviando paquetes o datagramas, el medio físico tiene que ser compartido

por más nodos, y por tanto, existen más colisiones y reintentos a la hora de acceder al medio físico. Además, la información transmitida por nodos los intermedios en estas redes crean un mayor número de rutas en la cual los nodos receptores para un escenario de baja densidad posiblemente no estarán recibiendo información respecto a un escenario de alta densidad debido a los reintentos en el envío de paquetes, generando así una disminución en el rendimiento de la red.

Por otra parte, los resultados mostraron que la densidad vehicular aumenta el porcentaje del PDR en un 10 % conforme aumenta el número de nodos, y bajo condiciones de nodos interferentes se da un incremento del 5 %. Para la parte del Delay podemos destacar que en los escenarios sin interferencia existe una variación de 0.08 segundos conforme aumenta la cantidad de nodos, sin embargo, en los escenarios con nodos interferentes, este valor aumenta en 0.5 segundos, esto se debe a las desconexiones que se generan entre el nodo fuente y el nodo destino a causa de la distancia que los separa y las interferencias producidas por los elementos que conforman el entorno urbano.

Otros de los efectos que se observó en estas simulaciones es que al comparar el tráfico TCP con UDP se obtiene un valor mucho más amplio en el tamaño de paquetes en el caso de UDP, ya que al ser un protocolo de tráfico a tasa constante y no orientado a conexión, los paquetes son enviados suceda lo que suceda en la red sin esperar recibir paquetes de reconocimiento o ACKS, lo que hace que este tráfico sea adecuado para el intercambio de contenido multimedia, dónde se permite pérdidas de datos con tal de recibir dicho contenido de una forma inteligible. Sin embargo, esto genera que un gran número de datagramas se pierdan a causa del desbordamiento de los buffers. Por su parte, TCP al ser un protocolo orientado a la conexión demostró una tasa de pérdidas menor, haciéndolo más óptimo para el intercambio de

información en estos entornos. Por tanto, se concluye que como UDP envía muchos más paquetes congestiona más el medio y consecuentemente los receptores acaban recibiendo menos paquetes que en el caso de TCP. Es así, que podemos sugerir que el throughput no se ve tan afectado, independientemente del protocolo de comunicación que se utilice.

Por otra parte, el efecto que tiene el tráfico interferente en el funcionamiento de las redes VANET podemos decir que es variable. En general, cuantos más saltos tengan las rutas (alta densidad) más afectaran las interferencias, puesto que la probabilidad de que un nodo deba retransmitir dos tráficos distintos es mayor. Dado esto es fácil que el nodo se sature y que la calidad de la transmisión empeore considerablemente (pérdida de paquetes, cambios de ruta constantes, etc.). En cambio, en los casos donde el número de saltos es menor, es más improbable que se llegue a situaciones de mal funcionamiento.

Otro aporte importante del presente trabajo es la metodología empleada para el análisis de los parámetros de transmisión dentro de un escenario urbano, la misma que puede ser utilizada para otros tipos de investigación referentes a VANET.

Finalmente, una de las limitaciones del presente trabajo, fue la representación topológica exacta del escenario urbano propuesto en NS-2. Sin embargo, esta limitación fue solventada al variar los parámetros de severidad de desvanecimiento del modelo de propagación y de esta manera se logró simular los obstáculos presentes en este tipo de escenarios.

Como trabajos futuros, puede resultar de interés estudiar el efecto de los modelos de propagación en los escenarios propuestos, ya que en este documento todo el estudio se ha realizado atendiendo a uno solo. También sería interesante poder comprobar el efecto de las

interferencias en ciudades inteligentes en donde existe una gran cantidad de dispositivos transmitiendo al mismo tiempo.

Otro trabajo a futuro sería poder comprobar el comportamiento de otros protocolos para un número elevado de nodos con más conexiones y en otros entornos, por ejemplo, en una autopista. Por otro lado, también se podrían desarrollar modelos analíticos que caractericen otros parámetros de las redes VANET como por ejemplo la ubicación óptima de las RSU. Así, se podría estudiar el número de peticiones de rutas, número de rutas encontradas, el tiempo que tarda en encontrarse una nueva ruta, etc. En cuanto a las herramientas de simulación para VANET, otro trabajo a futuro sería la integración de estas con NS-3.

En general se debe continuar trabajando e investigando en el tema de las redes VANET ya sea mediante simulaciones o modelos analíticos con un objetivo claro que es el de mejorar y garantizar la calidad de servicio (QoS) de estas redes.

Bibliografía

- Alam, M., Ferreira, J., & Fonseca, J. (2016). *Introduction to Intelligent Transportation Systems. In Intelligent Transportation Systems: Dependable Vehicular Communications for Improved Road Safety.*
- Albero, T. (2012). *Estudio y análisis del comportamiento de redes ad hoc móviles: Supervisión de procesos en entornos industriales.* Valencia, España: Académica Española.
- Baldessari, R., Festag, A., & Lenardi, M. (2007). C2C-C Requirements for Usage of NEMO in VANETs. *Empowered by Innovation NEC.*
- Batty, M., & Longley, P. (1994). *Fractal Cities: A Geometry of Form and Function.*
- Borboruah, G., & Nandi, G. (2014). A Study on Large Scale Network Simulators . *International Journal of Computer Science and Information Technologies, 5(6), 7318-7322.*
- Cañero, R. (2011). *Performance Evaluation of Realistic Scenarios for Vehicular Ad Hoc Networks with VANET MOBISIM and NS2 Simulators.* Universidad Politécnica de Catalunya.
- Cenerario, N., Delot, T., & Ilarri, S. (2011). A Content-Based Dissemination Protocol forVANETs: Exploiting the Encounter Probability. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 12(3), 771–782, DOI: 10.1109/TITS.2011.2158821.*
- Choffnes, D., & Bustamante, F. (2006). An integrated mobility and traffic model for vehicular wireless networks. *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks, 69-78, DOI: 10.1145/1080754.1080765.*

- Dressler, F., & Sommer, C. (2008). Progressing toward realistic mobility models in VANET simulations. *IEEE Communications Magazine*, 46(11), 132 - 137, DOI: 10.1109/MCOM.2008.4689256 .
- Ducrocq, T., Hauspie, M., Mitton, N., & Pizzi, S. (2014). On the Impact of Network Topology on Wireless Sensor Networks Performances: Illustration with Geographic Routing. *2014 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, 719–724, DOI: 10.1109/WAINA.2014.118 .
- Filali, F., Harri, J., & Bonnet, C. (2009). Mobility models for vehicular ad hoc networks: a survey and taxonomy. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 11(4), 19 - 41, DOI: 10.1109/SURV.2009.090403.
- Fratilescu, P. (2019). *Evaluación y Modelado de las Comunicaciones entre Vehículos (V2V)*. ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN.
- Giordano, E., Frank, R., Ghosh, A., Pau, G., & Gerla, M. (2009). Two Ray or not Two Ray this is the Price to Pay. *In Proceedings of the IEEE 6th International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS'09)*, 603-608, DOI: 10.1109/MOBHOC.2009.5336951.
- Gjessing, S., Zhang, Y., Liu, H., Ning, H., L., Y., & Guizani, M. (2013). Securing vehicle-to-grid communications in the smart grid. *IEEE Wireless Communications*, 20(6), 66–73, DOI:10.1109/MWC.2013.6704476.
- Granda, F., Azpilicueta, L., Celaya, M., Lopez, P., Vargas, C., & Falcone, F. (2020). Spatial V2X Traffic Density Channel Characterization for Urban Environments. *IEEE Transactions on*

Intelligent Transportation Systems (Early Access), 1-14,
DOI:10.1109/TITS.2020.2974692 .

Haerri, J., Fiore, M., Fethi, F., & Bonnet, C. (2006). VanetMobiSim: Generating Realistic Mobility Patterns for VANETs. *ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*.

Hartenstein, H., & Laberteaux, K. (2009). *VANET: Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies*.

Hashemi, P., & Abbaspour, R. (2015). Assessment of Logical Consistency in OpenStreetMap Based on the Spatial Similarity Concept. *Springer International Publishing, Editors: Jamal Jokar Arsanjani, Alexander Zipf, Peter Mooney, Marco Helbich, 75*, 19-36, DOI: 10.1007/978-3-319-14280-7_2.

Huhtonen, A. (2004). Comparing AODV and OLSR Routing Protocols. *CiteSeer*.

Hussain, R., Son, J., Kim, D., Nogueira, M., Oh, H., Tokuta, A., & J., S. (2017). PBF: A New Privacy Aware Billing Framework for Online Electric Vehicles with Bidirectional Auditability. *Wireless Communications and Mobile Computing* , 1-17, DOI: 10.1155/2017/5676030.

Issariyakul, T., & Hossain, E. (2010). *Introduction to Network Simulator NS2*. Boston, MA.

Jacquet, P., Laouti, A., Minet, P., & Viennot, L. (2001). *erformance Analysis of OLSR Multipoint Relay Flooding in Two Ad Hoc Wireless Network Models*. INRIA.

Jameel, F. F., Haider, A., & Butt, A. (2017). Performance analysis of VANETs under Rayleigh, Rician, Nakagami-m and Weibull fading. *2017 International Conference on Communication, Computing and Digital Systems (C-CODE)*, DOI: 10.1109/C-CODE.2017.7918915 .

- Jerbi, M., Sidi, S., Meraihi, R., & Ghamri, Y. (2007). An Improved Vehicular Ad Hoc Routing Protocol for City Environments. *In IEEE International Conference on Communications*, 3972–79 DOI: 10.1109/ICC.2007.654.
- Jin, W.-L., & Recker, W. (2010). An analytical model of multihop connectivity of inter-vehicle communication systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 9(1), 106 - 112, DOI: 10.1109/TWC.2010.01.05545 .
- Johnson, D., Hu, Y., & Maltz, D. (2007). The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4. *RFC4728* , 1-107, DOI:10.17487/RFC4728.
- Khairnar, V., & Kotecha, K. (2013). Simulation-Based Performance Evaluation of Routing Protocols in Vehicular Ad-hoc Network. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3(10), 1–14.
- Khana, A., Bilal, S., & Othmana, M. (2013). A Performance Comparison of Network Simulators for Wireless Networks. *ArXiv*.
- Khelifi, H., Luo, S., Nour, B., Moungha, H., Faheem, Y., Hussain, R., & Ksentini, A. (2019). Named Data Networking in Vehicular Ad hoc Networks: State-of-the-Art and Challenges. *Communications Surveys and Tutorials, IEEE Communications Society, Institute of Electrical and Electronics Engineers*, DIO: 10.1109/COMST.2019.2894816.
- Khorashadi, B., Chen, A., Ghosal, D., Chuah, C., & Zhang, M. (2007). Impact of Transmission Power on the Performance of UDP in Vehicular Ad Hoc Networks. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'07)*, 3698–3703.

- Krajzewicz, D., Hertkorn, G., Wagner, P., & Rossel, C. (2002). SUMO (Simulation of Urban MObility) An open-source traffic simulation. *Conference: 4th Middle East Symposium on Simulation and Modelling*, 183-187.
- Kumar, P., & Ramachandram, S. (2008). The performance evaluation of Genetic Zone Routing protocol for MANETs. *TENCON 2008 - 2008 IEEE Region 10 Conference*, DOI: 10.1109/TENCON.2008.4766848 .
- Lakas, A., Fekair, M., Korichi, A., & Lagraa, N. (2019). A multiconstrained QoS-compliant routing scheme for highway-based vehicular networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*.
- Lan, K., Karnadi, F., & Mo, Z. (2007). Rapid Generation of Realistic Mobility Models for VANET. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2506–2511, DOI: 10.1109/WCNC.2007.467.
- Liu, C., & Chigan, C. (2012). RPB-MD: Providing robust message dissemination for vehicular ad hoc networks. *Ad Hoc Netw*, 497–511.
- Martínez, F. (2010). *Improving Vehicular ad hoc Network Protocols to Support Safety Applications in Realistic Scenarios*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Martinez, F., Cano, J., Calafate, C. T., & Manzoni, P. (2008). CityMob: A Mobility Model Pattern Generator for VANETs. *ICC Workshops - 2008 IEEE International Conference on Communications Workshops*, DOI: 10.1109/ICCW.2008.76.
- Miller, J., & Horowitz, E. (2007). FreeSim - a free real-time freeway traffic simulator. *2007 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, 18-23, DOI:10.1109/ITSC.2007.4357627.

- Mir, Z., & Filali, F. (2014). LTE and IEEE 802.11p for vehicular networking: a performance evaluation. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 89, 1-15, DOI:10.1186/1687-1499-2014-89.
- Mittal, N., & Choudhary, S. (2014). Comparative Study of Simulators for Vehicular Ad-hoc Networks (VANETs). *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(4).
- Orozco, O., Chavarro, D., & Calderón, O. (2014). Impacto de la velocidad y modelo de movilidad en una comunicación de datos de una red vehicular. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 62 - 70.
- Piorkowski, M., Raya, M., Lezama Lugo, A., Papadimitratos, P., Grossglauser, M., & Hubaux, J.-P. (2008). TraNS: realistic joint traffic and network simulator for VANETs. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 12.
- Poonia, R., & Singh, V. (2012). Performance Evaluation of Radio Propagation Model For Vehicular Ad Hoc Networks Using VanetMobiSim and NS-2. *International Journal of Distributed and Parallel Systems*, 3(4), 145-155, DOI:10.5121/ijdpds.2012.3415.
- Pranav, K., Kapang, L., & Tuithung, T. (2011). Simulation based Analysis of Adhoc Routing Protocol in Urban and Highway Scenario of VANET. *International Journal of Computer Applications*, 12(10).
- Rehman, S., Arif Khan, M., A. Zia, T., & H. Khokhar, R. (2013). A Synopsis of Simulation and Mobility Modeling in Vehicular Ad-hoc Networks (VANETs). *IOSR Journal of Computer Engineering*, 15(2), 1-16.
- Rocha, F. (2010). *NS2 Visual Trace Analyzer. Manual of NS-2 Visual Trace Analyzer.*

- Roy, R. (2011). *Handbook of Mobile Ad Hoc Networks for Mobility Models*. New York, USA: © Springer Science+Business Media, LLC 2011.
- Sahoo, J., Wu, E., Sahu, P., & Gerla, M. (2011). Binary-Partition-Assisted MAC-Layer Broadcast for Emergency Message Dissemination in VANETs. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(3), 757 - 770, DOI: 10.1109/TITS.2011.2159003.
- Sax-Barnett, M. (2014). *An Introduction to OpenStreetMap*. Obtenido de State of the Map US.: <http://bit.ly/foss4g-osm>
- Shah, S., Ahmed, E., Imran, M., & Zeadally, S. (2018). 5G for Vehicular Communications. *IEEE Communications Magazine*, 56(1), 111 - 117, DOI: 10.1109/MCOM.2018.1700467.
- Sharma, Y., & Mukherjee, M. (2012). Comparative performance exploration of AODV, DSDV&DSR routing protocol in cluster based VANET environment. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 4(2), 120-127.
- Sormani, D., Turconi, G., Costa, P., Frey, D., Migliavacca, M., & Mottola, L. (2006). Towards Lightweight Information Dissemination in Inter-Vehicular Networks. *In Proceedings of the 3rd International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET '06)*, 20–29, DOI: 10.1145/1161064.1161069.
- Tarikul, I. (2013). *Statistical Modeling of Intelligent Transportation Systems Communication Channels*. Delft University of Technology.
- Toh, C., Martínez, F., Cano, J., Calafate, C., & Manzoni, P. (2011). A survey and comparative study of simulators for vehicular ad hoc networks (VANETs). *Wireless Communications and Mobile Computing*, 813–828, DOI:10.1002/wcm.859.

- Varga, A., & Hornig, R. (2008). An overview of the OMNeT++ simulation environment. *Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops, SimuTools 2008*, 1-10, DOI: 10.1145/1416222.1416290 .
- Wahida, I., Ikramb, A., Ahmada, M., Alia, S., & Alia, A. (2018). State of the Art Routing Protocols in VANETs: A Review. *The 9th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2018)*, 689–694, DOI:10.1016/j.procs.2018.04.121.
- Yan, G., & Rawat, D. (2016). Vehicle-to-Vehicle Connectivity Analysis for Vehicular Ad-Hoc Networks. *Ad Hoc Networks*, 58, 25-35, DOI:10.1016/j.adhoc.2016.11.017.
- Zeng, X., Bagrodia, R., & Gerla, M. (1998). GloMoSim: a library for parallel simulation of large-scale wireless networks, 28(1). *ACM SIGSIM Simulation Digest*, DOI:10.1145/278009.278027.
- Zhang, Q. (2017). *A Pervasive Prediction Model for Vehicular Ad-hoc Network (VANET)*. NOTTINGHAM TRENT UNIVERSITY.
- Zuo, J., Wang, Y., Liu, Y., & Zhang, Y. (2010). Performance Evaluation of Routing Protocol in VANET with Vehicle-Node Density. *In Proceedings of the 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM 2010)*, 1-4.