

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa

Posgrado en Ciencias y Tecnologías de la Información



Optimización del encaminamiento de mensajes en redes vehiculares

Idónea Comunicación de Resultados que presenta el

Ing. Erick Alejandro Pantoja Torres

*para obtener el grado de
Maestro en Ciencias y Tecnologías de la información*

Asesores:

Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos

Dr. Salvador González Arellano

Jurado:

Dr. Miguel López Guerrero, Presidente

Dr. Rafael Aguilar González, Vocal

Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos, Secretario

Ciudad de México, CDMX, agosto 2023

Resumen

Las redes vehiculares son un tipo especializado de redes de comunicación inalámbrica que se forman entre vehículos en movimiento. Estas redes permiten la comunicación entre vehículos, así como entre vehículos y dispositivos de infraestructuras que se encuentren a lado de las vías, lo que facilita el intercambio de información en tiempo real y la mejora de la seguridad vial y la eficiencia del tráfico. Las redes vehiculares utilizan tecnologías de comunicación inalámbrica, como WiFi o el estándar IEEE 802.11p, para establecer comunicaciones entre los vehículos. Dichas comunicaciones se basan en el principio de ad hoc, lo que significa que los vehículos actúan como nodos de red y se comunican directamente entre sí sin la necesidad de alguna infraestructura de red fija. Las redes vehiculares ofrecen una serie de beneficios y aplicaciones, que incluyen mejoras en la seguridad vial, optimización del tráfico, servicios de información en tiempo real y entretenimiento. En este trabajo presentamos un protocolo de encaminamiento diseñado para la comunicación entre vehículos en un entorno urbano. Para lograr esto, se utiliza el protocolo OLSR y la metaheurística de colonia de hormigas con el fin de optimizar los parámetros necesarios para alcanzar un rendimiento óptimo con base en las métricas de desempeño específicas para evaluar el protocolo. Tomando esto en cuenta, en este trabajo se presenta el diseño, la implementación y el análisis de resultados del protocolo denominado V-ACO-OLSR, mediante la realización de múltiples simulaciones. Los resultados obtenidos revelan un buen rendimiento en dos de las tres métricas utilizadas para evaluar el protocolo. Además, se ofrece un análisis diferente que no se había encontrado en la literatura.

Contenido

1. Introducción	4
1.1. Objetivos generales y particulares	6
1.2. Metodología	6
2. Antecedentes	8
2.1. Escenarios de comunicación	9
2.2. Entorno de propagación	10
2.3. Comunicación entre vehículos	11
2.4. Protocolos de encaminamiento de las redes vehiculares	11
2.4.1. Protocolos basados en la topología	12
2.4.2. Protocolos basados en posición	12
2.4.3. Protocolos basados en la multidifusión	13
2.4.4. Protocolos de encaminamiento basados en difusión amplia o <i>broadcast</i>	13
2.5. Estándar IEEE 802.11p	14
3. Estado del arte	16
3.1. Análisis y comparación de protocolos de encaminamiento	16
3.1.1. Modelos basados en la topología	16
3.1.2. Modelos basados en redes de sensores	20
3.1.3. Modelos basados en inteligencia artificial	22
3.2. Resumen del análisis de rendimiento de los protocolos de encaminamiento para las redes vehiculares ad hoc	24
4. Planteamiento del protocolo de encaminamiento	26
4.1. Herramientas de simulación	26
4.1.1. Simulador NS-3	27
4.1.2. SUMO	28
4.2. Protocolo de encaminamiento de estado de enlace optimizado	28
4.2.1. Funcionamiento básico de OLSR	29

4.2.2. Parámetros de ajuste de OLSR	30
4.3. Inteligencia artificial en redes vehiculares	32
4.3.1. Optimización de colonias de hormigas (ACO)	33
4.4. Propuesta del protocolo de encaminamiento	35
5. Diseño del protocolo de encaminamiento	37
5.1. Generación del tráfico	39
5.2. Simulación de la red	40
5.3. Optimización de los parámetros OLSR	41
6. Análisis de resultados	44
6.1. Escenario general	44
6.1.1. Configuración del área de simulación	44
6.1.2. Configuración de los parámetros de OLSR	45
6.1.3. Configuración de la metaheurística ACO	46
6.2. Resultados	47
6.3. Análisis del rendimiento de la red	51
7. Conclusiones	55

1. Introducción

En los últimos años, el avance en la tecnología de los sistemas de transporte inteligente (ITS, *Intelligent Transportation Systems*) ha provocado el desarrollo de aplicaciones que buscan satisfacer los problemas relacionados con la seguridad y confortabilidad en las carreteras. Entre ellas, se encuentran las aplicaciones que permiten comunicar a los vehículos entre sí mediante el uso del Internet de las cosas (IoT, *Internet of Things*). IoT, permite la interconexión entre dispositivos inteligentes inalámbricos para transmitir y recibir información con el fin de satisfacer diversas necesidades mediante la implementación de aplicaciones para resolver diferentes problemas.

Las redes vehiculares ad hoc (VANET, *Vehicular Ad Hoc Networks*), son infraestructuras de comunicación inalámbrica que se derivan de las redes móviles ad hoc (MANET, *Mobile Ad hoc Networks*), las cuales surgen con el propósito de mejorar la eficiencia del transporte que existe actualmente sobre la vía. La comunicación que suelen tener las redes VANET es de vehículo a vehículo (V2V, *Vehicle to Vehicle*) o vehículo a infraestructura (V2I, *Vehicle to Infrastructure*) sobre el camino. Las redes VANET, tienen como objetivo principal ofrecer servicios a los usuarios en las carreteras implementando diferentes aplicaciones como información del camino, violaciones de señales de tránsito, prevención de accidentes, notificaciones sobre límites de velocidad, entre otras más.

Para que esta comunicación pueda ser llevada a cabo, el comité de sistemas de transporte inteligente de la sociedad de tecnología vehicular (ITSS, *The Intelligent Transportation Systems Society*) de la IEEE propuso el estándar para las redes vehiculares IEEE 802.11p [1], que comprende de la capa física y la subcapa de control de acceso al medio (MAC, *Medium Access Control*). Con base en esto, se han propuesto diferentes protocolos de encaminamiento que buscan ser confiables y efectivos para cumplir las necesidades de los escenarios de las redes VANET. Estos protocolos en su mayoría caen en alguna de las siguientes clases: unidifusión, multidifusión o difusión amplia [2], dependiendo en muchas ocasiones del escenario en donde se desarrolla el protocolo.

En este trabajo, se lleva a cabo una exhaustiva investigación sobre los protocolos de

encaminamiento en redes VANET con el objetivo de analizar las herramientas utilizadas en su desarrollo, las técnicas o modelos empleados para resolver el problema, así como las métricas consideradas para evaluar cada uno de estos protocolos. De esta manera, se pretende examinar las ventajas y desventajas que presentan en comparación con otros protocolos existentes. Durante la investigación, se encontró que existen varios trabajos que logran buenos resultados en general. No obstante, al analizar las métricas utilizadas para evaluar estos protocolos, se observó que suelen presentar algunos resultados deficientes debido a las condiciones propias de las redes vehiculares. Teniendo en cuenta este análisis, en este trabajo se propone el protocolo V-ACO-OLSR, el cual se compara con otro protocolo que alcanza buenos resultados en general. Sin embargo, este último presenta un rendimiento deficiente en una métrica específica. Por lo tanto, el objetivo es encontrar una configuración que permita mejorar estos resultados y para lograrlo se utiliza el protocolo de encaminamiento de estado de enlace optimizado (OLSR, *Optimized Link State Routing*) y la metaheurística de optimización de colonias de hormigas (ACO, *Ant Colony Optimization*). La combinación de estos dos enfoques tiene como finalidad mejorar el rendimiento de la red en términos de confiabilidad, escalabilidad y baja latencia de extremo a extremo.

El trabajo se desarrolla de la siguiente manera, en la sección 2 se presentan los antecedentes generales para contextualizar el proyecto; en la sección 3 se presenta la investigación del estado de arte, en donde se habla sobre las referencias base para este trabajo; en la sección 4, el planteamiento general del protocolo; en la sección 5, el diseño del protocolo de encaminamiento que se utiliza; en la sección 6, se describen las características del escenario de pruebas, así como los resultados obtenidos de las evaluaciones. Finalmente, en la sección 7 se presentan las conclusiones de este trabajo.

1.1. Objetivos generales y particulares

Objetivo general: Mejorar un protocolo de encaminamiento para redes vehiculares utilizando el protocolo OLSR y la metaheurística colonia de hormigas. El propósito es buscar un mejor rendimiento del protocolo en función de las métricas de la tasa de entrega de paquetes, la carga de encaminamiento media y el retardo de extremo a extremo y alcanzar un mayor desempeño respecto a otros trabajos que se encuentren en la literatura.

Objetivos particulares:

- a. Realizar un análisis de los diversos protocolos de encaminamiento utilizados en redes vehiculares con el propósito de observar el desempeño de cada protocolo.
- b. Desarrollar un conjunto de simulaciones del protocolo para evaluar y analizar su desempeño en diversos escenarios y condiciones, buscando obtener resultados más confiables.
- c. Presentar una propuesta de dicho protocolo de encaminamiento, el cual debe de simularse y compararse con los protocolos base.

1.2. Metodología

Para realizar el siguiente trabajo se plantea hacer un estudio exhaustivo sobre las redes MANET y VANET con el fin de destacar las diversas características de su funcionamiento. El propósito principal es demostrar la importancia de desarrollar protocolos de encaminamiento específicos para las redes vehiculares. Al inicio, se analizarán en detalle las características mencionadas anteriormente y se revisarán distintos protocolos de encaminamiento que se encuentran en la literatura. Este análisis permitirá evaluar los modelos y herramientas utilizados en su desarrollo. Además, se investigará cuáles de estos protocolos han logrado obtener mejores resultados, los tipos de escenarios en donde se ha probado y qué herramientas se emplearon para facilitar su implementación. También, se explorarán posibles tendencias relacionadas con protocolos o algoritmos específicos.

Una vez completada esta revisión, se seleccionará un trabajo existente en la literatura que haya alcanzado buenos resultados en términos de métricas de desempeño. No obstante, se

identificará la oportunidad de optimizarlo mediante el uso de otras técnicas o métodos. Esta selección se realiza para evaluar, al final del estudio, el rendimiento del protocolo propuesto. Finalmente, se procederá al diseño, desarrollo e implementación del protocolo seleccionado. Se realizarán diversas simulaciones para evaluar su desempeño, teniendo en cuenta las métricas necesarias para observar el comportamiento del protocolo. Además, se analizará si existen tendencias positivas al aumentar la cantidad de vehículos en un área determinada.

2. Antecedentes

Con el avance que se ha tenido en los sistemas móviles, han surgido aplicaciones para resolver distintos problemas del ser humano con el paso del tiempo. Una de estas aplicaciones son las redes MANET, las cuales surgen como una alternativa para evitar las redes con infraestructura debido a que existen numerosos escenarios en donde es imposible contar con las características de una red cableada. Una red MANET, es una red inalámbrica, sin infraestructura y altamente dinámica en la que cada nodo puede unirse y posteriormente abandonar la red debido a la rapidez y a los movimientos que hace cada elemento. Los nodos pueden actuar como un enrutador que transmite y recibe información y que, a través de múltiples saltos entre nodos vecinos, los datos puedan llegar al nodo final. Las principales características de las redes MANET son la adaptabilidad, una topología dinámica, recursos limitados y un rango limitado de comunicación con elementos cercanos [3].

Posteriormente, a partir de las redes MANET, surgen como una variante las redes VANET, que tienen como objetivo principal permitir la comunicación entre vehículos cercanos y entre vehículos y equipos fijos que se encuentren sobre la vía. A partir del surgimiento de las redes VANET, muchos protocolos que se habían desarrollado para las MANET se comenzaron a implementar en dicha variante por sus similitudes [4]; sin embargo, estos protocolos no funcionan correctamente debido principalmente a las siguientes diferencias:

- Una red vehicular es altamente dinámica, ya que el vehículo es el nodo y este puede alcanzar velocidades elevadas de 30-50 *km/h* en entornos urbanos y hasta más de 120 *km/h* en escenarios de autopistas. Esto provoca que se formen topologías de redes altamente dinámicas, en donde los nodos se pueden unir o salir de la red en un período de tiempo muy corto, lo que genera un mayor índice de pérdida de datos transmitidos.
- El movimiento de los nodos está restringido a la topología de la vía, es decir, a las carreteras por donde está transitando el vehículo.
- La densidad de los nodos es mayor y variable dependiendo del entorno en donde se despliegue la red.
- Los saltos múltiples entre los nodos es complejo debido a la gran movilidad de los nodos

Estas características de las VANET resaltan la importancia de considerar y desarrollar protocolos específicos para este tipo de red.

2.1. Escenarios de comunicación

Como se había mencionado, la comunicación en las redes VANET es entre vehículos y entre vehículos y dispositivos fijos que se encuentren sobre la vía, lo que lleva a tres posibilidades, como se muestra en la figura 1.

- Vehículo a vehículo (V2V):** Permite una comunicación entre vehículos directa sin ningún dispositivo intermedio en la vía. Esta comunicación puede emplearse principalmente en aplicaciones de seguridad, protección y difusión [5].
- Vehículo a Infraestructura (V2I):** Permite una comunicación entre vehículos y algún dispositivo que se encuentre al borde de la vía. Esta comunicación puede emplearse principalmente para aplicaciones de recopilación de información y datos [5].
- Comunicación híbrida:** Permite una comunicación combinada de V2V como de V2I.

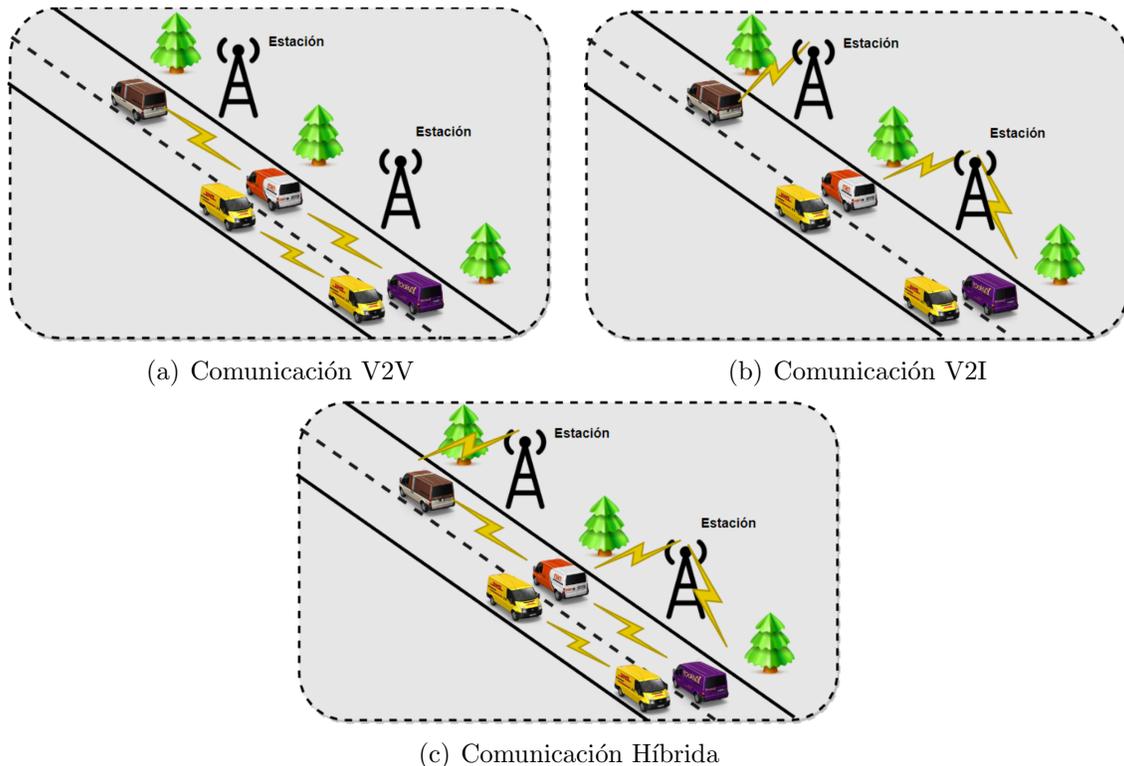


Figura 1: Escenarios de comunicación

2.2. Entorno de propagación

El entorno de propagación es el escenario en donde se prueba la red VANET y es muy importante debido a que cada escenario tiene diferentes características como la velocidad, el tipo de movilidad de los nodos, el desvanecimiento de la señal por obstáculos, entre algunas más. Las características de los principales entornos se enlistan a continuación:

- **Áreas urbanas:** En estas áreas suele haber vías con uno o dos carriles para cada dirección. Además, es común que exista una alta densidad de tráfico en la mayoría del tiempo debido a la presencia de casas, edificios, parques y personas, entre otros factores, que obstaculizan el flujo vehicular. Por lo tanto, el tráfico por lo regular es de medio a alto.
- **Áreas rurales:** En estas áreas normalmente hay vías de un solo carril para cada dirección, además de que generalmente no hay casas o edificios alrededor, pero sí hay más elementos naturales como árboles o colinas que pueden evitar la comunicación entre dispositivos en algún momento. Dadas estas situaciones, el tráfico por lo regular es de medio a bajo.
- **Autopistas:** En estas áreas hay vías de dos a cinco carriles para cada dirección y normalmente no existe ningún tipo de obstáculo alrededor que evite la comunicación entre los vehículos. El tráfico por lo regular es de medio a bajo, pero depende mucho del horario o incluso de la estación del año.

Estas características dependen directamente de la ciudad o incluso del país en donde se desea desplegar una red VANET. Sin embargo, es muy importante tomar en cuenta el entorno en el que se prueba la red debido a que la mayoría de los protocolos de encaminamiento funcionan correctamente en un escenario, pero no tan bien en otros, esto debido a las características antes mencionadas.

2.3. Comunicación entre vehículos

Las redes VANET admiten diferentes métodos para transmitir información, las principales se enlistan a continuación:

- **Comunicación unidifusión:** El tipo de comunicación es uno a uno, es decir, de un dispositivo transmisor a un dispositivo receptor en una red inalámbrica, en donde pueden existir uno o varios saltos. El nodo receptor debe estar en una ubicación cercana para que los nodos vecinos puedan comunicarse con él. Esta comunicación es útil para las redes vehiculares, sin embargo, para un escenario con una gran cantidad de vehículos puede tener un bajo desempeño si no se realiza una buena implantación.
- **Comunicación multidifusión - geográfica:** Su objetivo principal es realizar una comunicación grupal, es decir, un nodo transmisor envía información simultánea a un cierto grupo de la red; por ejemplo, los más cercanos. Esta comunicación es más adecuada para las redes vehiculares debido a que un nodo puede enviar información a un cierto grupo de nodos y a su vez estos pueden reenviarla a sus vecinos y así, llegar más rápido al nodo objetivo. Sin embargo, se debe tener cuidado con los mensajes redundantes porque pueden consumir el ancho de banda de la red. La comunicación geográfica se considera un subgrupo de la comunicación de multidifusión porque toma diferentes parámetros para elegir los nodos a los que le desea enviar información [5].
- **Comunicación de difusión amplia:** Esta comunicación se utiliza para enviar mensajes a todos los nodos vecinos de la red y a su vez estos a sus nodos vecinos con el propósito de propagarse más rápido.

2.4. Protocolos de encaminamiento de las redes vehiculares

Como se había mencionado, las redes VANET utilizan una estrategia para el envío de datos con el fin de maximizar el rendimiento de la red y minimizar los retardos y las pérdidas. Los protocolos de las redes vehiculares en la literatura se dividen principalmente en

cuatro categorías: el encaminamiento basado en topología, basado en posición, basado en multidifusión y el basado en la difusión amplia o *broadcast*.

2.4.1. Protocolos basados en la topología

Este tipo de protocolos utilizan la información de las rutas de comunicación para el envío de datos. A su vez, estos se dividen en protocolos proactivos, reactivos e híbridos. Los protocolos proactivos utilizan tablas de encaminamiento para enviar los datos al mejor nodo; sin embargo, al ser una red altamente dinámica cabe la posibilidad que en un corto período de tiempo aparezcan y desaparezcan nodos y, por lo tanto, cambie la topología de la red. Esto involucra que la tabla de encaminamiento se actualice en un período de tiempo corto, lo que puede llegar a ocupar una gran parte del ancho de banda y de procesamiento de información [6]. Los protocolos reactivos, a diferencia de los proactivos, funcionan bajo demanda, es decir, cuando un nodo desea enviar información, se comienza a generar la tabla de encaminamiento para encontrar la mejor ruta utilizando un paquete de descubrimiento para encontrar el mejor camino. En dado caso que el nodo que recibe el paquete de descubrimiento no conozca el nodo destino, retransmitirá la información. En el momento en el que el paquete llegue al destino, este revierte la ruta empleando una comunicación de unidifusión hacia la fuente [6]. Los protocolos híbridos combinan las ventajas que tienen los dos protocolos antes mencionados, sin embargo, no son muy utilizados debido a que son más adecuados para redes con un número limitado de nodos [7].

2.4.2. Protocolos basados en posición

Estos protocolos se basan en la disponibilidad de información de la posición física de los nodos, es decir, mediante algún dispositivo de ubicación en tiempo real como un sistema de posicionamiento global (GPS, *Global Positioning System*). La ventaja que tiene este tipo de protocolos es que no necesitan de descubrimiento de rutas ni de tablas de encaminamiento debido a que el equipo de localización sirve para elegir la mejor opción para enviar los datos de un nodo fuente al nodo destino [6]. Los protocolos basados en la posición también se dividen en tres tipos: tolerantes al retardo, no tolerantes al retardo e híbridos. Los protocolos

tolerantes al retardo consideran una conectividad intermitente, es decir, que la red puede sufrir desconexiones frecuentes, lo que provoca una falta de rutas al momento de enviar información. Los protocolos no tolerantes al retardo transmiten la información lo antes posible al nodo o a los nodos más cercanos, esto los hace apropiados para entornos urbanos en donde se tiene una alta tasa de tráfico; sin embargo, podrían fallar si algún nodo no encuentra algún vecino al cual enviar los datos. Finalmente, los protocolos híbridos aprovechan las ventajas que tienen los dos tipos de protocolos anteriores para enviar información a un nodo objetivo [7].

2.4.3. Protocolos basados en la multidifusión

Estos protocolos se basan en la difusión de información desde un único nodo a toda la red mediante la comunicación de varios saltos. Se dividen en tres tipos: difusión geográfica, difusión móvil y clúster. Los protocolos de difusión geográfica, como ya se había mencionado anteriormente, implementan un encaminamiento de multidifusión basados en la posición física en donde se encuentra un grupo de nodos. Los protocolos de difusión móvil, a diferencia de los protocolos de difusión geográfica tienen como parámetro el tiempo, es decir, cuando se envía la información a un grupo de nodos en una cierta área se debe mandar en determinado tiempo. Los protocolos basados en clústeres se dividen en grupos pequeños y en cada grupo hay un nodo encargado de llevar a buen término la comunicación que existe en ese determinado grupo [6].

2.4.4. Protocolos de encaminamiento basados en difusión amplia o *broadcast*

Estos protocolos difunden la información desde una única fuente a todos los nodos de la red que se encuentren actualmente activos. Regularmente, se utilizan en las redes vehiculares para compartir las condiciones actuales de la carretera, el tráfico, accidentes y en general emergencias que se dan en las vías [6].

2.5. Estándar IEEE 802.11p

Con el inicio de los sistemas de transporte inteligente, se comenzó una investigación para lograr un intercambio de información V2V o V2I debido a una potencial área de oportunidad que se tiene para mejorar la seguridad en las carreteras. Debido a esto, los gobiernos, las instituciones académicas y la industria fueron abriéndose camino para llevar a la realidad las ITS. En 1999, la Comisión Federal de Comunicaciones asignó una banda dedicada de comunicaciones de corto alcance (DSRC, *Dedicated short-range communications*) de 75 MHz centrada en 5.9 GHz para las comunicaciones vehiculares. El sistema DSRC, admite una velocidad de hasta 200 km/h, un rango de transmisión nominal de 300 m (hasta 1000 m) y una velocidad de datos predeterminada de 6 Mbps (hasta 27 Mbps) [5]. Esta banda de frecuencia centrada en 5.9 GHz, se divide en seis canales de servicio y un canal de control con un ancho de banda de 10 MHz cada uno. Según el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*), a cada canal se le asigna una diferente aplicación. El intervalo de 5.855 a 5.875 GHz está dedicado a aplicaciones ITS que no son de seguridad, de 5.875 a 5.905 GHz a seguridad y tráfico y el de 5.905 a 5.925 GHz a futuras aplicaciones ITS [5]. En la figura 2, se muestra cómo está dividida la banda de frecuencia [8].

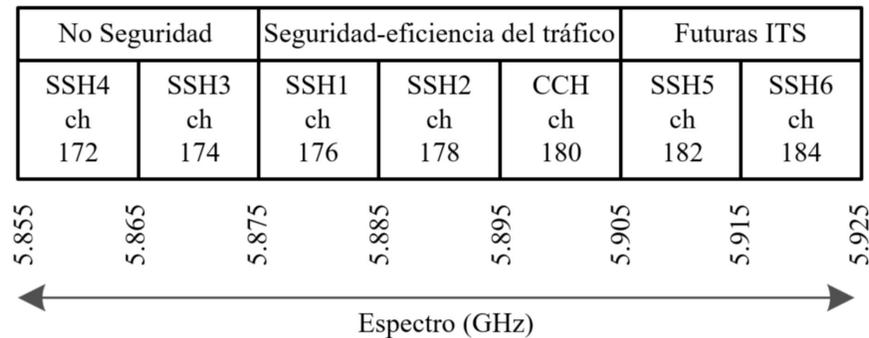


Figura 2: Funcionamiento de los siete canales en redes vehiculares.

En DSRC, los mensajes o la información que se envía tienen dos prioridades diferentes:

- Prioridad baja: Para los mensajes de difusión de datos transmitidos en los canales de servicio (SCH, *Service Channels*).

- **Prioridad alta:** Para los mensajes de seguridad o control transmitidos en el canal de control (CCH, *Control Channel*).

Posteriormente, en 2010 se aprobó el estándar IEEE 802.11p, acceso inalámbrico en entornos vehiculares (WAVE, *wireless access in vehicular environments*) [1] y así satisfacer las características de las redes VANET. El estándar es de gran interés para la comunidad de investigación, la cual busca evaluar y mejorar su rendimiento. *wave* propone modificaciones en la capa física y de control de acceso al medio del estándar inalámbrico IEEE 802.11 para poder desarrollar mejor las aplicaciones ITS. Su objetivo principal es utilizar *wave* como un estándar para todas las redes VANET debido a que está diseñado para cumplir los requisitos de las comunicaciones V2V y V2I, en donde se requiere de confiabilidad y una baja latencia para una operación adecuada. IEEE 802.11p *wave* implementa multiplexión por división de frecuencia ortogonal (OFDM, *Orthogonal frequency-division multiplexing*) para controlar el acceso al medio y el mecanismo de detección de portadora para reducir colisiones. En la figura 3, se muestra la pila de protocolos para los sistemas *wave* [5].

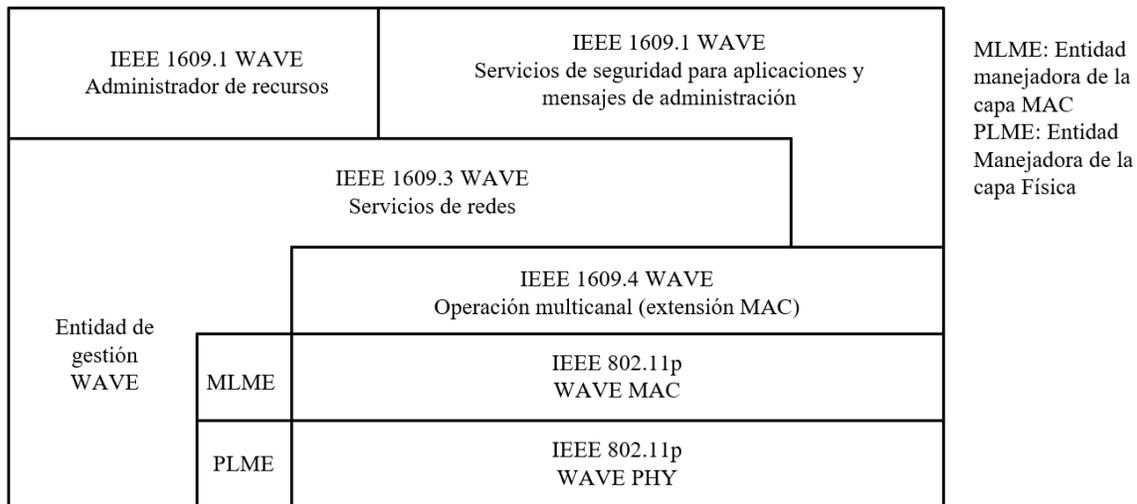


Figura 3: Arquitectura del sistema *wave*.

3. Estado del arte

Como se ha mencionado anteriormente, en la literatura existe una gran diversidad de protocolos de encaminamiento para lograr una eficiencia en escenarios para las redes VANET. Estas propuestas se desarrollan implementando diferentes técnicas, herramientas y parámetros para lograr su objetivo. Es por ello que en esta sección, se presenta un análisis de diferentes modelos que se han desarrollado con la finalidad de tomarlos como base para proponer una mejora a un protocolo de encaminamiento. Este análisis consiste en revisar las técnicas, los parámetros, los escenarios y las herramientas utilizadas para simular o probar el sistema y, en función de ello, tomar en cuenta las ventajas y desventajas observadas por los autores sobre su investigación.

3.1. Análisis y comparación de protocolos de encaminamiento

3.1.1. Modelos basados en la topología

El protocolo de encaminamiento por vector distancia secuenciado por destino (DSDV, *Destination-Sequenced Distance-Vector*), está basado en el algoritmo de Bellman Ford [9] y se encuentra en la categoría de protocolos proactivos. Estas tablas se emplean para almacenar la información de los nodos vecinos como el número de saltos, la dirección de destino, el número de secuencia, entre algunas más. Cabe mencionar que esta técnica de encaminamiento fue inicialmente propuesta para las redes MANET y, con el paso del tiempo, los investigadores la adaptaron para las redes VANET. Como se había mencionado, las tablas de encaminamiento se actualizan periódicamente mediante paquetes de refresco y, con cada nueva entrada, se genera un nuevo número de secuencia [10].

El protocolo de encaminamiento de vector distancia ad hoc bajo demanda (AODV, *Ad Hoc On-Demand Distance Vector*), es una modificación a DSDV y se encuentra en la categoría de protocolos bajo demanda o reactivos. Esto debido a que no se actualiza tablas de encaminamiento periódicamente, es decir, sólo lo hacen cuando se necesita enviar información de un nodo fuente a un nodo destino. Para esto, se envía un mensaje de solicitud de ruta (RREQ, *Route Request*) a los nodos vecinos para encontrar la ruta hacia el destino. Este

RREQ contiene información de dirección de origen, destino, número de secuencia y número de saltos. En el momento que se encuentra el nodo deseado, este envía un mensaje de respuesta de ruta (RREP, *Route Reply*) para el nodo fuente a fin de iniciar la transmisión [10].

El protocolo OLSR, se encuentra en la categoría de técnicas proactivas debido a que utiliza mensajes de saludo, una declaración de interfaz múltiple y control de topología para descubrir la ruta y difundir la información sobre la red. Se basa principalmente en el uso de estaciones dedicadas denominadas pasarelas multipunto (MPR, *multipoint relays*), las cuales se implementan para reenviar la información en una comunicación *broadcast* provocando que el protocolo sea más organizado y eficiente en el tráfico de datos debido a que evita una sobrecarga en la red con mensajes de señalización [11].

Finalmente, el protocolo de encaminamiento de origen dinámico (DSR, *Dynamic source routing*), utiliza dos técnicas, que son: descubrimiento y mantenimiento de la ruta con el propósito de que los nodos mantengan y reconozcan las rutas de nodos fuente a nodos objetivos que se encuentran en la red [12].

Tomando en cuenta lo anterior, en [11] se evalúa el rendimiento de los protocolos AODV, OLSR y DSDV utilizando las métricas: tasa de entrega de paquetes, rendimiento, sobrecarga de encaminamiento y retado de extremo a extremo. Los autores de ese trabajo evalúan estos protocolos utilizando el simulador de movilidad BonnMotion, el cual permite generar escenarios de movilidad para las redes VANET como la velocidad de los nodos, la densidad de la red y la probabilidad de pausa. Esta herramienta es utilizada por los autores porque permite exportar estos escenarios al simulador de eventos discretos (NS-3, *Network Simulator 3*), el cual es ampliamente utilizado en las redes vehiculares porque cuenta con una gran cantidad de módulos y herramientas para desarrollar diferentes protocolos.

El escenario de simulación propuesto por los autores es un área urbana en forma de cuadrado de dimensión de $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ con dirección de las vías en ambos sentidos. En las pruebas, se generan varios escenarios modificando la velocidad y la densidad de nodos en la simulación. La tabla 1, muestra los principales parámetros que se utilizan en la evaluación.

Tabla 1: Parámetros de simulación.

Configuración de la simulación	Datos de entrada
Duración	100 <i>s</i>
Número de nodos	30, 40, 50
Velocidad promedio	35 <i>m/s</i>
Protocolo MAC	802.11p

Los resultados obtenidos al comparar los tres protocolos con respecto a la tasa de entrega de paquetes, la tasa de transferencia efectiva, la sobrecarga y el retardo de extremo a extremo, modificando la cantidad y velocidad de los nodos, muestran que AODV tiene un buen funcionamiento cuando la velocidad de los nodos es menor que 35 *m/s* debido a que ésta no es tan alta y porque los nodos están más alejados entre sí. A medida que aumenta la velocidad, AODV comienza a tener un mal comportamiento al igual que DSDV, puesto que los nodos entran y salen más rápido del rango de comunicación de los demás nodos. Por tanto, después de implementar todas las simulaciones, los autores concluyen que OLSR es el que tiene un mejor comportamiento debido principalmente a la técnica MPR, la cual permite que el encaminamiento sea más organizado, eficiente y escalable.

En [13], se busca una configuración de parámetros ideal para ese sistema y los autores proponen usar el protocolo OLSR y un método de optimización, el cual involucra diferentes enfoques metaheurísticos como algoritmos genéticos para alcanzar resultados óptimos dividiendo a la red en grupos. El algoritmo genético considera que todos los vehículos son homogéneos, por lo que la asignación a cada grupo es aleatoria. Utiliza un vector de dirección (DV) que considera el movimiento de los vehículos como bidireccional, este DV consta de n elementos, cada uno representa el movimiento en la dirección del nodo y son representados como cromosomas del algoritmo genético. Las herramientas que emplean los autores en su trabajo son MobiSim para crear el escenario del movimiento de los nodos y el simulador de eventos discretos NS-2, el cual se encarga de crear y cargar los módulos necesarios a los nodos para que estos puedan intercambiar información según el protocolo OLSR. La tabla 2, muestra los principales parámetros que se utilizan en el modelo.

Tabla 2: Parámetros de simulación.

Configuración de la simulación	Datos de entrada
Área de simulación	1100 m \times 1100 m
Número de nodos	50
Velocidad	10-50 km/h
Protocolo MAC	802.11b

Para evaluar el protocolo OLSR genético, los autores utilizan el protocolo OLSR original considerando las métricas del retardo de extremo a extremo, energía gastada, la latencia y la tasa de entrega de paquetes. Los resultados obtenidos muestran que el protocolo de encaminamiento genético OLSR tiene un mejor comportamiento respecto a OLSR de base en todos las métricas consideradas. Los autores concluyen que el enfoque del algoritmo genético ayuda a maximizar la entrega de paquetes y a disminuir la latencia, y el retardo de extremo a extremo.

En [12], los autores evalúan los protocolos AODV, DSDV, OLSR y DSR con diferentes densidades de nodos utilizando NS-3 y el simulador de movilidad urbana (SUMO, *Simulation of Urban Mobility*) debido a que ofrecen la posibilidad de una simulación escalable para sistemas de redes inalámbricas. Las métricas de desempeño utilizadas para la evaluación son: el rendimiento, número de paquetes descargados y la sobrecarga de encaminamiento. A partir de los resultados obtenidos por los autores, se concluye que OLSR tiene un mejor funcionamiento respecto a los otros protocolos en tres de las métricas contemplados en la evaluación de cada uno de estos modelos.

En [14], los autores analizan el modelo denominado encaminamiento de ubicación direccional basado en lógica difusa (FLDLR, *Fuzzy logic-based directional location routing*) con el objetivo de realizar una eficiente entrega de datos seleccionando al mejor candidato en dirección del nodo final. En el momento en el que se desea enviar información, el nodo fuente verifica si el nodo final está dentro del alcance de sus vecinos y, en caso de que no sea así, envía mensajes de acuse de recibo a todos ellos. Utilizando la lógica difusa, se les asigna a todos los nodos un valor de peso con la intención de elegir al mejor candidato, según sea el que tenga el peso máximo y así sucesivamente hasta llegar al destino. Este parámetro toma en cuenta la velocidad, la dirección, la cercanía y la tasa de transmisión de los datos del

nodo y mediante una función ponderada se elige al siguiente vecino. La tabla 3, muestra los principales parámetros que se utilizan en el modelo.

Tabla 3: Parámetros de simulación.

Configuración de la simulación	Datos de entrada
Área de simulación	800 m \times 800 m
Número de nodos	5 - 50
Velocidad	5 - 90 km/h
Protocolo MAC	802.11

Los autores comparan el protocolo con dos modelos de referencia existentes en la literatura. Para evaluar el rendimiento de FLDLR con los algoritmos de referencia, se toma en cuenta la distancia de un salto, dirección del movimiento de nodo, duración del enlace, sobrecarga de encaminamiento y retraso de extremo a extremo. Los autores concluyen que su modelo selecciona el mejor salto al nodo vecino, además de que en cada una de las métricas de encaminamiento, supera a los dos algoritmos de referencia. Por otro lado, mencionan que su modelo para elegir el siguiente salto funciona mejor cuando se ejecuta en una red densa.

3.1.2. Modelos basados en redes de sensores

Las redes de sensores vehiculares (VSN, *Vehicular Sensor Networks*) son una arquitectura que surge para innovar las aplicaciones de los sistemas de transporte inteligente. Esto porque permite implementar diferentes modelos en las VANET. Debido a que los sensores se encargan de almacenar la información, procesarla y enviarla a través de la red mediante una comunicación V2I o V2V. Es por ello que este tipo de aplicaciones adoptan un enfoque centralizado para almacenar la información, teniendo en cuenta que se debe actualizar continuamente [15].

Con base en lo anterior, en [16] se propone un modelo analítico de VSN denominado *Streaming Vehdoop* con el objetivo de reducir el consumo del ancho de banda que se da en las VANET por sus características. El funcionamiento de este modelo es, primero, formar grupos de nodos y seleccionar a los vehículos reductores en cada grupo de forma autónoma mediante el algoritmo de transmisión de clústeres de Vehdoop (SVC, *Streaming Vehdoop Clustering*) diseñado específicamente para este protocolo. Los vehículos al transitar, recopilan

la información cada segundo y se la envían a los vehículos reductores, estos vehículos se conectan a canales inalámbricos para comunicarse con dispositivos que se encuentran al lado de la vía para enviársela al proveedor de servicio y transmitir o recibir paquetes de información. Cabe mencionar que este modelo se ejecuta periódicamente.

Para evaluar el rendimiento de este modelo, se utiliza la herramienta SUMO para generar trazas aleatorias de los movimientos de los vehículos en un escenario de un área de $1000 m^2$. Esta herramienta se utiliza porque puede generar un archivo con las trazas de los vehículos y exportarlos al simulador NS-3, el cual se encarga de simular la comunicación V2V y V2I. La tabla 4, muestra los principales parámetros que se utilizan en el modelo.

Tabla 4: Parámetros de simulación.

Configuración de la simulación	Datos de entrada
Área de simulación	$1000 m^2$
Número de nodos	100, 200, 300
Velocidad	0 – 50 <i>km/h</i>
Protocolo MAC	802.11a
Información c-v	1, 5, 10

Los autores evalúan el modelo utilizando las métricas específicas que denominan pérdida de pares clave-valor (KPLR), la cual consiste en la pérdida de pares clave-valor dentro de los grupos (intra-KPLR) y la tasa de pérdida entre grupos (inter-KPLR). Debido a que este modelo es el primero en evaluar esta técnica, no había otros modelos para compararlo. Por lo tanto, los autores implementan un modelo centralizado (CP) en donde los vehículos recopilan la información cada 5 s y un método denominado Gateway (GW), en donde sólo se tiene un vehículo reductor. El resultado en esta simulación muestra que el modelo *Svehdoop* KPLR tiene un mejor comportamiento respecto a los otros modelos en todas las métricas consideradas. Los autores concluyen que existe una clara superioridad de este modelo respecto al resto de los mecanismos utilizados.

En [17], se realiza un análisis del rendimiento del uso compartido de sensores en redes VANET. Los autores de este trabajo proponen un modelo de una red de intercambio de sensores, esto consiste en que los vehículos envían su información actual como la posición, velocidad, y dirección mediante una única transmisión, además de enviarse entre ellos in-

formación del rango específico que tiene cada sensor. Este último proceso se modela con la técnica VeMAC, en donde los vehículos monitorean el canal de comunicación en busca de un espacio libre para transmitir. Para evaluar el rendimiento de esta red, los autores realizan simulaciones considerando la relación de recepción de paquetes y el retraso. La tabla 5, muestra los principales parámetros que se utilizan en el modelo.

Tabla 5: Parámetros de simulación.

Configuración de la simulación	Datos de entrada
Longitud de carretera	2000 <i>m</i>
Densidad de vehículos	10 – 50 <i>vehículos/km</i>
Velocidad	80 – 120 <i>km/h</i>
Rango de transmisión	200 <i>m</i>

Al evaluar el modelo, los autores observan que el retardo aumenta y que la relación de recepción de paquetes disminuye con una mayor tasa de mensajes y un mayor rango de intercambio. Esto debido a que al aumentar estos parámetros, incrementan los paquetes en la transmisión, lo que causa una mayor congestión en el canal de comunicaciones.

3.1.3. Modelos basados en inteligencia artificial

Como se ha mencionado a lo largo de este documento, diseñar e implementar protocolos de encaminamiento es todo un desafío. Los objetivos que persiguen la mayoría de ellos es ajustar sus parámetros para aumentar su desempeño y tener mejores resultados cuando se evalúa la red. Es por ello que una de las técnicas cada vez más empleada en las redes VANET es el uso de metaheurísticas debido a que implementan una función objetivo que les permite optimizar los valores de las métricas utilizados para evaluar el modelo, sin importar las características iniciales que se establezcan.

En [18], los autores utilizan métodos de optimización basados en metaheurísticas inspiradas en la naturaleza para mejorar el desempeño del manejo de la información en las redes VANET. Los algoritmos considerados son el algoritmo murciélago (BA, *Bat algorithm*), el algoritmo de la luciérnaga (FA, *Firefly algorithm*), el algoritmo de Optimización del enjambre de partículas (PSO, *Particle swarm optimization*) y el algoritmo Búsqueda de Cuco (CS, *Cuckoo search*). Estas metaheurísticas, se comparan con un algoritmo genético y un enfoque

de vanguardia para la difusión de información. Además, hacen uso de una técnica en donde los vehículos utilizan una infraestructura virtual (VI) con el propósito de evitar las unidades del lado de la carretera (RSU, *Road side units*) y, a su vez, aumentar el área de aplicación. Para evaluar la red, los autores realizan simulaciones con NS-2 y la herramienta SUMO para generar las trazas de movilidad de los nodos. La tabla 6, muestra los principales parámetros que se utilizan en el modelo.

Tabla 6: Parámetros de simulación.

Configuración de la simulación	Datos de entrada
Área de simulación	600 <i>m</i> × 700 <i>m</i>
Número de nodos	45
Velocidad	10 – 50 <i>km/h</i>
Duración	180 <i>s</i>
Protocolo MAC	802.11p

Los autores comparan el rendimiento de los protocolos tratando de maximizar el porcentaje de las áreas cubiertas, que son aquellos espacios en donde hay por lo menos un vehículo que recibe un mensaje de difusión y minimizar el número de vehículos seleccionados como vehículo virtual. Los autores encuentran que el algoritmo con mayor rendimiento es FA, mientras que BA, CS y PSO tienen un rendimiento similar. Respecto a los algoritmos de referencia, su comportamiento está por debajo de los cuatro algoritmos y, por tanto, los autores concluyen que es mejor el desempeño de las metaheurísticas inspiradas en la naturaleza.

En [19], se presenta un modelo de optimización para ajustar los parámetros de encaminamiento en redes VANET para mejorar la estabilidad y la calidad de la transferencia de paquetes. Los autores proponen un nuevo enfoque al protocolo OLSR denominado FA-OLSR, debido a que añaden el algoritmo de luciérnaga multiobjetivo (FA). Este nuevo modelo consta de tres fases: generación de tráfico, simulación de red y la fase de optimización. La primera fase utiliza la herramienta OpenStreetMap para generar el escenario y SUMO para generar el tráfico en ese escenario; en la segunda fase, se utiliza la herramienta NETSIM versión 10 para desarrollar y simular el protocolo de encaminamiento y la tercera fase hace uso del algoritmo FA, el cual mediante su función objetivo asigna los valores más adecuados a los parámetros de este modelo.

La tabla 7, muestra los principales parámetros que se utilizan en el modelo.

Tabla 7: Parámetros de simulación.

Configuración de la simulación	Datos de entrada
Área de simulación	$750\text{ m} \times 750\text{ m}$
Número de nodos	20 – 100
Velocidad	30 <i>km/h</i>
Protocolo MAC	802.11p

Los autores comparan el protocolo FA-OLSR con otros modelos similares que ellos han realizado en otros trabajos con las siguientes métricas: tasa de entrega de paquetes, la carga de encaminamiento media y el retardo de extremo a extremo. Los resultados obtenidos muestran que la proporción de entrega de paquetes y la carga de encaminamiento media tienen el mejor comportamiento respecto a los otros modelos de referencia. En cuanto al retardo de extremo a extremo, FA-OLSR se encuentra en la segunda posición. Los autores concluyen que el método propuesto tiene un mejor rendimiento respecto a otros algoritmos que utilizan técnicas similares para protocolos de encaminamiento.

3.2. Resumen del análisis de rendimiento de los protocolos de encaminamiento para las redes vehiculares ad hoc

La tabla 8, resume los trabajos mencionados en la sección anterior sobre los protocolos de encaminamiento para las redes VANET, basados en simulación. De la tabla, se puede observar que la mayoría de los trabajos utilizan NS-2 o NS-3 porque son simuladores de eventos discretos muy populares para redes VANET debido a los módulos que tienen integrados. El uso de un simulador de tráfico es muy importante cuando se desea realizar pruebas más cercanas a la realidad porque en ellas se pueden evaluar escenarios en donde se examine mejor el rendimiento de los protocolos de encaminamiento y, es por eso, que muchos autores los consideran en sus investigaciones.

Tabla 8: Análisis de rendimiento de los protocolos para las redes VANETs.

Ref.	Protocolos basados en	Herram.	M. de desempeño	Protocolo(s)	Resultado
[11]	topología	B-Motion NS-3	PDR^1 Tasa de transf. efect. Sobrecarga $E2ED^2$	AODV OLSR DSDV	OLSR funciona mejor en todos los parámetros.
[12]	topología	SUMO NS-3	Rendimiento N. de paquetes des. ³ Sobrecarga	AODV OLSR DSDV DSR	OLSR funciona mejor en tres de los cuatro los parámetros
[13]	topología	Mobisim NS-2	$E2ED$ Latencia Energía gastada PDR	GA-OLSR OLSR	OLSR funciona mejor en todos los parámetros
[14]	multidifusión	NS-2	Distancia de salto Dirección del nodo Duración del enlace Sobrecarga $E2ED$	LAR D-LAR FLDLR	FLDLR funciona mejor en todos los parámetros
[16]	multidifusión	SUMO NS-3	Tasa de pérdida en iG^4 Tasa de pérdida en G^5	KPLR CP Gateway	KPLR funciona mejor en todos los parámetros
[17]	multidifusión		PRR^6 Retraso	VSN	Se disminuye el tiempo de PRR
[18]	multidifusión	SUMO NS-2	Max áreas cubiertas Min núm de VI	FA PSO BA CS	CS funciona mejor
[19]	topología	SUMO NS-3 OSM	PDR MRL^7 $E2ED$	FA-OLSR BLOSR-PSO PCOG-OLSR OLSR-RFC	FA-OLSR funciona mejor

¹Package delivery ratio

²End to end delay

³Número de paquetes descargados

⁴Tasa de pérdida de pares clave-valor dentro del grupo

⁵Tasa de pérdida de pares clave-valor entre grupo

⁶Relación de recepción de paquetes

⁷Medium routing load

4. Planteamiento del protocolo de encaminamiento

Considerando el análisis de la sección anterior, las redes VANET tienen una alta movilidad debido a la velocidad que los automóviles logran alcanzar en las carreteras, lo que da por resultado una pérdida de comunicación constante entre los vehículos y, por tanto, el aumento de la pérdida de mensajes que se están enviando en ese momento en la red. Debido a este gran inconveniente, se han desarrollado diferentes protocolos de encaminamiento con el fin de resolver este problema y satisfacer lo mejor posible las necesidades de este tipo de redes. Para enfrentar estos inconvenientes se debe utilizar un protocolo que cumpla ciertas características para tener un buen funcionamiento como un ancho de banda restringido y cobertura de rango de transmisión.

Estos protocolos se diseñan con el objetivo de encontrar la ruta óptima en el menor tiempo posible, por lo que suelen centrarse en ajustar los parámetros del modelo para seleccionar los nodos vecinos adecuados lo más rápido posible y así lograr optimizar la comunicación. En la literatura, se encuentran trabajos que desarrollan distintas técnicas y buscan satisfacer las necesidades de las redes VANET; sin embargo, muchas de estas investigaciones no logran garantizar una estabilidad de las métricas de desempeño. Por lo que descubrir los valores adecuados para desarrollarlo es un gran desafío para los investigadores que están en la búsqueda de mejorar el rendimiento de su sistema.

En este trabajo, se presenta una propuesta destinada a mejorar el protocolo de encaminamiento V-ACO-OLSR en una red VANET. El objetivo principal es optimizar las métricas adecuadas para obtener resultados superiores a los mostrados en propuestas anteriores. Basándonos en el análisis de los trabajos previos, se consideran las siguientes herramientas y modelos para su desarrollo.

4.1. Herramientas de simulación

Los trabajos que se encuentran en la literatura sobre redes VANET, por lo general, suelen desarrollarse mediante el uso de herramientas que simulan la movilidad, los protocolos, los parámetros, entre otras características. El motivo principal es que el desarrollo de un

escenario real es muy complejo y costoso debido a todos los elementos que se necesitan para crearlo y, además, probar dicho escenario no es algo trivial. Es por ello que los investigadores han optado por desarrollar sus trabajos en simuladores de red que suelen funcionar correctamente porque tienen los módulos para simular un escenario cercano a la realidad. Estos simuladores, cuentan con la opción de representar el encaminamiento, la eficiencia de la red, la movilidad de los nodos, entre muchas más opciones que permiten al investigador desarrollar casi cualquier proyecto que desee. Entre los simuladores más populares para las redes VANET suelen ser NS-2 [20], NS-3 [21], Omnet++ [22], Opnet [23] y NetSim [24].

Otra herramienta que se utiliza frecuentemente en las VANET son los simuladores de tráfico. Esta herramienta se usa para simular el movimiento de los vehículos en determinado escenario con la finalidad de que el protocolo de encaminamiento que se desarrolle pueda evaluarse con una movilidad cercana a lo que sucedería en la realidad, puesto que permite generar diferentes elementos como vehículos, carreteras, semáforos, límite de velocidad, de aceleración, entre otras más dependiendo de lo que se desee desarrollar. Los generadores de tráfico más populares para las redes VANET suelen ser SUMO [25] y BonnMotion [26].

4.1.1. Simulador NS-3

NS-3 es un simulador de eventos discretos para sistemas de Internet, el cual es usado especialmente en la educación y la investigación. El simulador es un software gratuito de código abierto, lo que permite el desarrollo de nuevas actualizaciones por la comunidad mundial y, además, cuenta con licencia GNU y GPLv2 [21]. Cabe mencionar que el uso principal de lenguaje de programación suele ser Python o C++, siendo este último el más usado por los investigadores. NS-3, actualmente se ha convertido en una de las herramientas con mayor auge en la investigación de redes, esto principalmente a las constantes actualizaciones por parte de la comunidad académica y científica y a la gran cantidad de módulos para distintas ramas de las redes, lo que lo convierte en uno de los simuladores más completos. Sin embargo, la curva de aprendizaje del simulador es lenta debido a la dificultad para implementar o adaptar sus módulos existentes a diferentes problemas de redes. A pesar de esta situación, NS-3 es una gran herramienta y es muy utilizada.

4.1.2. SUMO

SUMO es un simulador de tráfico de código abierto y gratuito, el cual está disponible desde el año 2001 y se diseña en el lenguaje XML. SUMO permite modelar distintos elementos del tráfico como vehículos en la carretera, transporte público, peatones, entre muchas más. Además, incluye una gran cantidad de módulos que se pueden utilizar para automatizar tareas básicas como la creación, ejecución y evaluaciones de simulaciones del tráfico, el cálculo de rutas y el cálculo de emisiones [25]. SUMO es una herramienta que se utiliza para trabajos relacionados con las redes ad hoc, puesto que puede simular los movimientos y las características de diferentes elementos, y para el caso de las redes VANET, generar la movilidad, la velocidad, la aceleración, patrones de movilidad al incluir semáforos, elementos específicos, entre algunas cosas más.

4.2. Protocolo de encaminamiento de estado de enlace optimizado

El protocolo OLSR fue estandarizado en el año 2003 por el grupo de trabajo de ingeniería de internet (IETF, *Internet Engineering Task Force*) en la norma RFC (*Request for Comments*) 3626. OLSR, es un protocolo proactivo desarrollado para implementarse en redes MANET, el cual surge a partir del protocolo clásico del estado del enlace con el propósito de disminuir la sobrecarga de las actualizaciones del estado actual de cualquier enlace de la red. Hace uso de intercambios de mensajes periódicos de control denominados ‘HELLO’ y ‘TC’ entre todos los nodos que se encuentran activos en la red con el objetivo de conocer a los nodos vecinos de cada nodo de máximo dos saltos. Sin embargo, este intercambio de mensajes conlleva a inundar la red debido al reenvío ciego de mensajes, lo que puede llegar a consumir gran parte del ancho de banda de la red.

Para evitar este escenario, OLSR utiliza la técnica de pasarelas multipunto MPR, que consiste en elegir ciertos nodos como MPR para minimizar la sobrecarga de mensajes que inundan la red y así reducir las retransmisiones redundantes en la misma región. La elección de estos nodos consiste, inicialmente, en que un determinado nodo n seleccione un subconjunto de nodos MPR entre sus nodos vecinos de un salto, y a su vez estos cubran, en términos

de distancia, a todos los nodos que estén a dos saltos del nodo fuente. Estos nodos MPR son la base de este protocolo debido a que son los únicos que se encargan de enviar mensajes a los nodos vecinos, lo que provoca que la inundación de los mensajes periódicamente no sea tan densa y evite que se consuman los recursos del sistema.

En la figura 4, se muestra un ejemplo de envío de mensaje a un conjunto de nodos usando menos retransmisiones a través de los nodos MPR, evitando así, retransmisiones por inundación que no son necesarias.

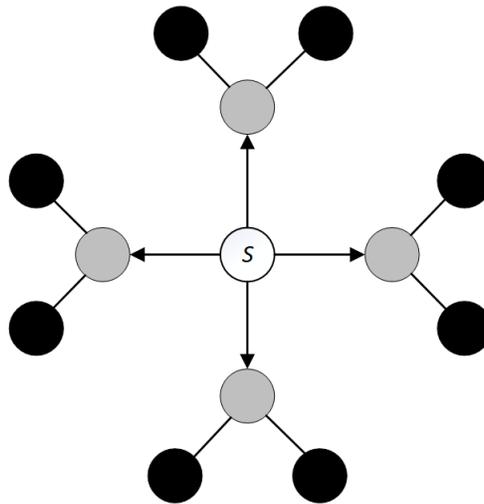


Figura 4: Funcionamiento de los nodos MPR.

El protocolo OLSR selecciona los nodos grises como MPR y, por lo tanto, en este ejemplo sólo se requiere de cuatro retransmisiones para enviarles mensajes a los nodos vecinos del nodo fuente.

4.2.1. Funcionamiento básico de OLSR

El funcionamiento del protocolo OLSR está formado por los siguientes elementos:

- Formato del paquete y envío: Se especifica un formato de paquete y un mecanismo de inundación optimizado para todo el tráfico de control de OLSR.
- Detección de enlaces: Se logra enviando periódicamente los mensajes HELLO a través de las interfaces y verificando la conectividad.

- Detección de vecinos: Se deduce el número de nodos vecinos analizando la detección de enlaces.
- Selección de MPR: El objetivo de utilizar nodos MPR, es que ese nodo seleccione un subconjunto de sus vecinos estratégicamente para que, en el momento de enviar el mensaje de difusión, sean retransmitidos por esos vecinos seleccionados y se llegue a todos los nodos a dos saltos de distancia.
- Difusión de mensajes de control de topología: Estos mensajes se difunden para proporcionar a cada nodo información sobre el estado del enlace y así permitir el cálculo de la ruta.
- Cálculo de la ruta: Utilizando la información del estado del enlace y la configuración de los nodos, se calcula la tabla de encaminamiento para cada nodo.

4.2.2. Parámetros de ajuste de OLSR

Para obtener mejores beneficios del protocolo OLSR, se deben ajustar sus parámetros de configuración críticos porque tienen un gran impacto en el funcionamiento del protocolo de encaminamiento y pueden llegar a afectar en gran medida su rendimiento. Los mecanismos que maneja OLSR están predefinidos en su RFC y se muestran en la tabla 9 [27].

Tabla 9: Parámetros de OLSR.

Parámetros	Valor estándar
Intervalos de emisión	
HELLO INTERVAL	2.0 S
REFRESH INTERVAL	2.0 S
TC INTERVAL	5.0 S
HNA INTERVAL	5.0 S
Tiempo de espera	
NEIGHB HOLD TIME	6.0 s
TOP HOLD TIME	15.0 s
MID HOLD TIME	15.0 s
DUP HOLD TIME	30.0 s
HNA HOLD TIME	15.0 s
WILLINGNESS	3

La funcionalidad de cada uno de estos parámetros se enlista a continuación:

- HELLO INTERVAL: Este parámetro indica el intervalo de tiempo entre dos mensajes de saludo, es decir, es el tiempo en el cual el nodo mantiene la información de los vecinos de uno y dos saltos.
- REFRESH INTERVAL: Indica el intervalo de tiempo en el cual cada enlace y vecino deben saludarse al menos una vez.
- TC INTERVAL: Este atributo indica el intervalo de tiempo entre los mensajes de control de topología. Estos son generados por los MPR para manejar la información de la conectividad y topología de la red para posteriormente crear la tabla de encaminamiento de cada nodo.
- HNA INTERVAL: Indica el intervalo de tiempo en el que se proporciona información sobre las direcciones de red y máscara de red.
- NEIGHB HOLD TIME: Este parámetro especifica el intervalo de tiempo de validez del enlace entre los nodos.
- TOP HOLD TIME: Indica el intervalo de tiempo de validez para la información de los mensajes TC.
- MID HOLD TIME: Intervalo de tiempo de validez para la información de los mensajes MID.
- DUP HOLD TIME: Es el intervalo de tiempo en el que los nodos MPR registran información sobre los paquetes reenviados.
- HNA HOLD TIME: Intervalo de tiempo de validez para la información de los mensajes HNA.
- WILLINGNESS: Indica la disponibilidad del nodo para reenviar tráfico en nombre de otros nodos.

4.3. Inteligencia artificial en redes vehiculares

El encaminamiento de los mensajes en las redes vehiculares puede llegar a ser un problema costoso en términos computacionales y de almacenamiento debido principalmente a la alta movilidad de los nodos. Esto provoca que los enlaces que se tienen no se puedan utilizar y, por tanto, el mensaje no llega a su destino y el paquete debe retransmitirse ya sea por otra ruta o, en el peor de los casos, se pierda. Tomando este escenario como base, se analizan diferentes soluciones de trabajos que se han desarrollado para resolver el envío de mensajes en redes VANET. Una línea de investigación que ha tomado fuerza recientemente entre los investigadores es el uso de las metaheurísticas, las cuales pretenden minimizar el tiempo para encontrar la ruta óptima entre un nodo fuente y el nodo destino. Con el paso de los años, estos algoritmos se han estado optimizando desde que se crearon y se han implementado en diferentes líneas de investigación para obtener mejores resultados, tal es el ejemplo de las redes MANET [28].

En la literatura, se encuentra que se han desarrollado trabajos utilizando diferentes metaheurísticas para mejorar los resultados de las métricas considerados para evaluar la red; sin embargo, casi ninguno menciona por qué se eligió ese algoritmo en particular. Es importante elegir el algoritmo adecuado para el escenario en el que se desee desplegar la red y los parámetros en los que se desea mejorar sus resultados. Analizando diferentes investigaciones, en [28] se menciona que los enfoques basados en inteligencia de enjambre requieren ligeramente menores recursos computacionales a los algoritmos tradicionales y, aun así, conducen a una solución óptima, lo que hace posible aplicarlos en problemas de optimización de rutas terrestres, de sensores inalámbricos, MANET, por mencionar algunos.

Por tanto, las redes VANET al ser una variante de las MANET se les puede implementar las técnicas de inteligencia de enjambre para optimizar las rutas y los mensajes puedan llegar al destino en el menor tiempo posible.

4.3.1. Optimización de colonias de hormigas (ACO)

El algoritmo inspirado en la inteligencia de enjambre ACO, lo presentan Dorigo et al. en [29]. Esta metaheurística trata de replicar el comportamiento de búsqueda y de recolección de alimentos de un conjunto de hormigas, denominado colonia de hormigas. Para el proceso de búsqueda, las hormigas se comunican indirectamente a través de un tipo de feromonas que sólo este insecto puede detectar para ir dejando un rastro en el camino y así, en el momento en el que se encuentre una fuente de alimento, la hormiga recorra un camino favorable desde la fuente hasta el lugar en donde se encuentra la colonia. Posteriormente, otros miembros de la familia comenzarán a recorrer ese y otros caminos que consideren óptimo, provocando que el nivel de feromonas aumente dependiendo del número de miembros que recorran esa ruta y así sucesivamente, hasta que el mejor camino sea el que tenga la mayor cantidad de feromonas.

ACO es un algoritmo basado en un sistema de población que se utiliza para encontrar soluciones aproximadas a problemas de optimización discretos difíciles, tal es el caso de la optimización de rutas para las redes VANET [28]. La técnica consiste en generar varias hormigas artificiales, las cuales son capaces de aprender sobre el espacio de búsqueda mientras el algoritmo se está ejecutando y, a su vez, las hormigas están adquiriendo experiencia para encontrar una mejor solución en cada una de las iteraciones. Desde que surgió la metaheurística, se han propuesto diferentes variantes del algoritmo de optimización de colonias de hormiga, no obstante, todos desarrollan la misma idea del algoritmo original llamado sistema de hormigas (AS, *Ant System*).

Los componentes de un algoritmo de colonia de hormigas son [29]:

- Hormiga artificial: Realiza un recorrido (ciclo completo cerrado) dentro de un problema.
- Memoria de feromona: Se utiliza para revisar el recorrido de las hormigas y poder cambiar la intensidad de cada posible ruta a cada nueva iteración.
- Probabilidad de seleccionar un camino: Es la toma de decisión de cada hormiga al momento de elegir un camino para ir de un nodo a otro.

La fórmula que define esta probabilidad se denomina regla de transición de estados aleatorios y está dada por:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \times \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{c_{il} \in \mathbf{N}(s^p)} \tau_{ij}^\alpha(t) \times \eta_{ij}^\beta(t)} & \text{si } c_{ij} \in \mathbf{N}(s^p) \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (1)$$

Donde $\mathbf{N}(s^p)$ es el conjunto de posibles soluciones, c_{ij} es una posible solución η_{ij} está dado por el número inverso de la distancia entre dos nodos i y j , τ_{ij} es la traza de feromonas dejada entre dos nodos, k es la representación de la hormiga y α y β son parámetros que tienen el control sobre la intensidad de la feromona. Esto da como resultado una probabilidad para cada camino posible para que una hormiga determine la ruta hacia el nodo j que no haya sido visitado desde el nodo i en cada iteración. Posteriormente, se utiliza la función denominada impregnación de las feromonas en la ecuación 2 para saber la calidad de la solución encontrada.

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L^k} & \text{si la hormiga } k \text{ pertenece a } (i, j) \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2)$$

Donde L^k es la longitud del recorrido de la hormiga k y Q es una constante. La regla es aplicada a todos los arcos que pertenecen al recorrido realizado por la hormiga k . Finalmente, se utiliza la función de atenuación de las feromonas en la ecuación 3, este proceso es importante debido a que evapora las trazas de feromonas garantizando que la memoria global del sistema deseche las malas soluciones encontradas con la siguiente regla:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \times \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (3)$$

donde, $0 < \rho < 1$ es el índice de evaporación de la feromona.

En el algoritmo 1, se muestra el pseudocódigo de ACO [30].

Algoritmo 1 Pseudocódigo de ACO

```
1: Entrada: numVar                ▷ número de variables de decisión de la hormiga
2: Entrada: numIter              ▷ total de iteraciones
3: Salida: mejorSolución
4: PosNodo();                    ▷ Llamar a la función que inicializa la posición de los nodos
5: InitAnt();                    ▷ Llamar a la función que inicializa los valores de la hormiga
6: while numIter > 0 do
7:   for i=0 hasta totalHormigas do
8:      $n_{ij}$  = función objetivo del espacio de búsqueda
9:     reglaTransición[i] =  $p_{ij}$ 
10:  end for
11:  Seleccionar al nodo con el más alto  $p_{ij}$ 
12:  Actualizar el nivel de feromonas  $T_{ij}$ 
13:  numIter = numIter - 1
14: end while
15: mejorSolución = solución con la mejor probabilidad
16: Salir(mejorSolución)
```

4.4. Propuesta del protocolo de encaminamiento

Tomando en cuenta las herramientas y técnicas mencionadas anteriormente, se propone desarrollar una mejora a un protocolo de encaminamiento denominado V-ACO-OLSR utilizando el simulador NS-3 para implementar el encaminamiento de los nodos y SUMO para generar la movilidad de los vehículos. El uso de esta herramienta permite exportar un archivo con la extensión tcl compatible con un módulo NS-3 y así poder implementarlo en el protocolo de encaminamiento. Para esto, se decide tomar como base el trabajo en [19], el cual implementa la metaheurística luciérnaga multiobjetivo con el protocolo OLSR el cual los autores llaman FA-OLSR.

FA-OLSR busca optimizar los parámetros de OLSR mediante una función objetivo que pondera la reputación de las métricas de desempeño, las cuales son la tasa de entrega de paquetes (PDR, *package delivery ratio*), la carga de encaminamiento media (MRL, *medium routing load*), y el retardo de extremo a extremo (E2ED, *end-to-end delay*). Los resultados obtenidos en ese trabajo alcanzan mejores resultados en comparación con otros protocolos con los que se compara. Sin embargo, se observa que este modelo no obtiene el mejor resultado en el retardo de extremo a extremo. Con base en este escenario, se busca implementar la

metaheurística optimización de colonias de hormigas (ACO, *Ant Colony Optimization*) y el protocolo OLSR para mejorar los resultados obtenidos en el retardo de extremo a extremo que se da en la investigación antes mencionada y conservar, o en dado caso mejorar, los resultados de las demás métricas con los que se evalúa el protocolo. Para evaluar el protocolo V-ACO-OLSR se tomarán como medida las mismas métricas de desempeño, el PDR, el MRL y el E2ED

5. Diseño del protocolo de encaminamiento

En esta sección, se presenta el desarrollo del protocolo de encaminamiento de V-ACO-OLSR utilizando la metaheurística ACO y el protocolo OLSR basándose en el planteamiento en la subsección anterior de este trabajo. Como se había mencionado, el objetivo es mejorar las métricas de desempeño con el fin de maximizar el PDR y minimizar el MRL y el E2ED. Para desarrollar este sistema, se diseña un modelo que consta principalmente de tres etapas, como se muestra en la figura 5.

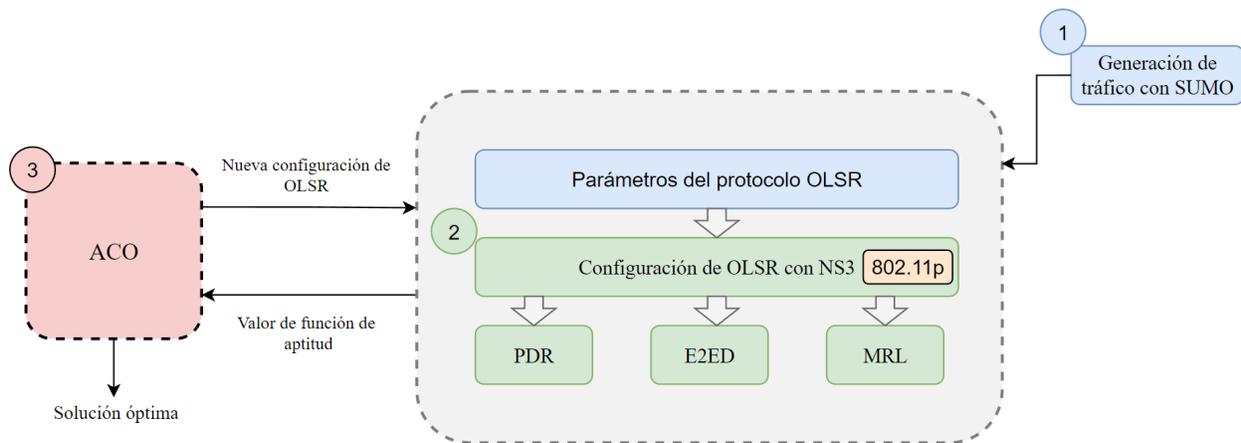


Figura 5: Diagrama general de V-ACO-OLSR.

- 1. Generación del tráfico vehicular:** En esta etapa, se considera la herramienta SUMO para simular la movilidad de los nodos. Al generar el archivo con extensión tcl, éste se importa al simulador NS-3 para generar el protocolo de encaminamiento.
- 2. Simulación de la red:** En esta etapa, se debe considerar el estándar IEEE 802.11p *wave*, que se utiliza para equipar a los vehículos y ayudarlos a intercambiar mensajes. Posteriormente, se utiliza el protocolo OLSR para descubrir los nodos vecinos mediante los mensajes de control que utiliza, obtener la tabla de encaminamiento e implementar el intercambio de mensajes entre los nodos activos de la red.
- 3. Optimización de los parámetros OLSR:** En esta etapa, se optimiza la ruta de los nodos que van a intercambiar mensajes, para esto se implementa la metaheurística opti-

mización de colonias de hormigas ACO, la cual se encarga de analizar los parámetros de OLSR mediante una función de aptitud para encontrar los valores adecuados y evitar la sobrecarga de mensajes.

El modelo de red a analizar consiste de un entorno urbano, por lo que la velocidad promedio de los vehículos está entre 35 y 40 km/h. Un escenario general se observa en la figura 6.

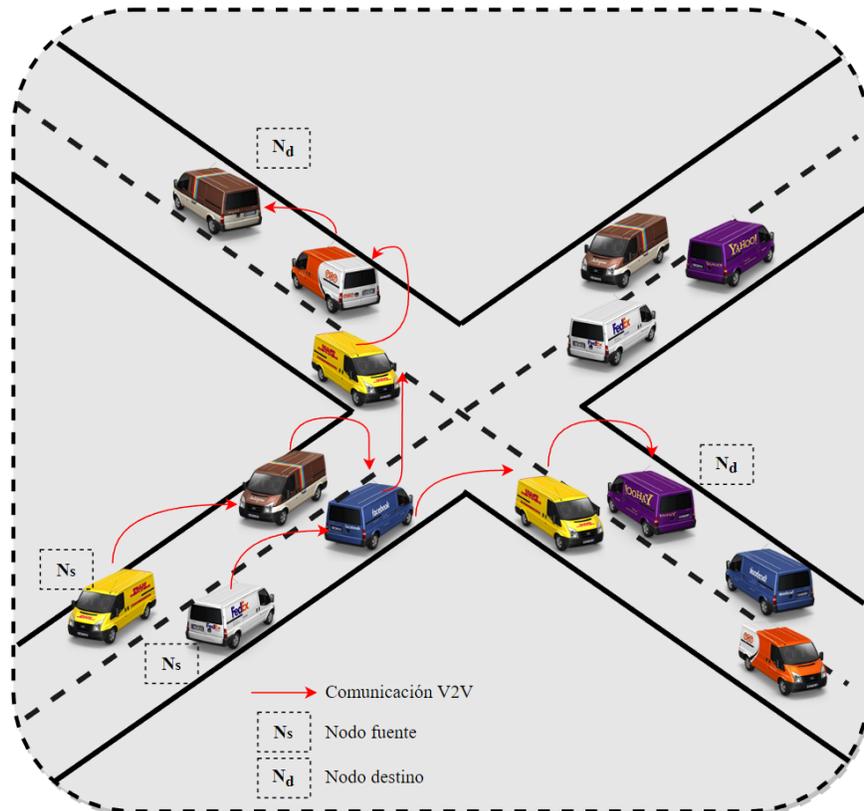


Figura 6: Escenario general.

Los elementos que se pueden identificar en el escenario son:

- a. Escenario de comunicación: Como se había mencionado en la sección 2.1, existen varios tipos de comunicaciones en las redes vehiculares. Para este trabajo, se desarrolla una comunicación vehículo a vehículo (V2V), tal como en [19].
- b. Nodo fuente - destino: Este tipo de nodo es el encargado de generar o recibir un paquete, en general, cualquier nodo de la red puede ser un nodo fuente o destino.

5.1. Generación del tráfico

Para la movilidad de los vehículos se utiliza SUMO, que permite generar un archivo tcl que contiene cada uno de los movimientos que hace cada vehículo. Para generar este archivo, se siguen los siguientes pasos:

- a. Elegir el área por donde transitan los vehículos, lo cual se puede implementar de varias maneras, sin embargo, la mejor forma es utilizar OpenStreetMap debido a que permite seleccionar un área real de cualquier parte del mundo y exportarlo en un archivo osm. Posteriormente, se utiliza el módulo ‘netconvert’ que genera un archivo net.xml, el cual es compatible con todos los módulos y herramientas que tiene este simulador.
- b. El siguiente paso es generar la movilidad de los vehículos en el área seleccionada. Tal como en el caso anterior, el simulador tiene algunas opciones para implementarlo, sin embargo, entre mayor sea el número de vehículos es más conveniente utilizar el módulo ‘randomTrips’, porque permite generar movimientos aleatorios en toda la vía de n cantidad de vehículos y, para esto, solo es necesario utilizar el archivo del paso anterior. Después de utilizarlo, se genera un archivo rou.xml, el cual contiene el movimiento de cada vehículo y, además, permite ser modificado para agregarle características a cada uno de ellos como la velocidad, aceleración, color, dimensión, el momento en el que aparece en la vía para hacer su recorrido, entre algunas más.
- c. El último paso es utilizar el módulo ‘traceExporter’ para convertir la información de los dos archivos anteriores y generar un archivo con extensión tcl. Este archivo, mediante el uso de una expresión general, permite a NS-3 obtener el movimiento de cada vehículo a través de todas las vías.

Es importante considerar que SUMO cuenta con la herramienta ‘NetEdit’ que permite crear sistemas de vías o en dado caso, modificar el archivo net.xml del paso (a) dependiendo de las necesidades o características que se deseen.

5.2. Simulación de la red

Para configurar el protocolo de encaminamiento, se deben seguir los siguientes pasos:

- a. Configurar un contenedor con el número de nodos, el cual se obtiene del escenario de SUMO.
- b. Agregar a cada uno de los nodos la capa física y la capa de enlace con el estándar 802.11p *wave* utilizando la configuración predeterminada y con una potencia de transmisión de 33 *dBm* que permite la comunicación a una distancia aproximada de hasta 200 *m*.
- c. Posteriormente, se utiliza el archivo tcl de SUMO y mediante una expresión regular se obtienen los movimientos, la velocidad y la aceleración que tienen los nodos dependiendo del escenario.
- d. El siguiente paso es agregar a cada uno de los nodos el protocolo OLSR. El simulador NS-3 cuenta con algunos protocolos de encaminamiento como AODV, DSDV, OLSR, entre algunos más. Para agregar OLSR a los nodos, se debe agregar el módulo ‘OlsrHelper’ al contenedor de nodos de los nodos. Al utilizar el módulo, este se configura de manera predeterminada, esto incluye los parámetros de los paquetes de control que se difunden periódicamente para mantener la información de la topología de la red y que se mencionan en la sección 4.2.2. Después de agregar el módulo OLSR a los nodos, automáticamente comienzan a enviar paquetes de control entre ellos. Esto implica que se puede obtener la tabla de encaminamiento, y por ende, los nodos vecinos de cualquier nodo.
- e. El siguiente paso es incluir la forma en que se envían los mensajes entre los nodos activos de la red. Para esto, NS-3 cuenta con algunas funciones que permiten generar tráfico aleatorio en una red, sin embargo, no es algo trivial saber cómo se da ese intercambio de mensajes al momento de la simulación. Por lo anterior, se decide desarrollar una aplicación que utiliza la tabla de encaminamiento que genera OLSR para generar el

intercambio de mensajes aleatorios entre todos los nodos, es decir, cualquier nodo puede ser fuente, destino o bien un intermediario que sólo retransmite el mensaje. En este escenario, NS-3 permite obtener la tabla de encaminamiento en cualquier intervalo de tiempo y, con base en ello, se hace todo el proceso anterior.

- f. Finalmente, se agrega la metaheurística ACO para ajustar los parámetros de OLSR críticos en el momento en que la red tenga un mal desempeño.

5.3. Optimización de los parámetros OLSR

La simulación del protocolo de encaminamiento con los valores predeterminados de OLSR, es decir, sin modificar ninguno de sus parámetros, suele arrojar resultados aceptables. Esto se debe a que la tasa de tráfico en un determinado escenario puede variar y generar resultados diferentes de una simulación a otra, incluso cuando se mantienen las mismas características del escenario. Esto puede generar a resultados no confiables, ya que el intervalo de soluciones sería muy amplio. Para evitar esta situación, se contemplan dos principales escenarios críticos que se describen a continuación.

- a. El primer escenario se da cuando existe una gran cantidad de vehículos en la red. En este caso se debe reducir la cantidad de mensajes periódicos de control porque puede llegar a existir una sobrecarga en la red debido a la alta demanda de mensajes enviados por los vehículos. Esta situación puede generar un incremento en la cantidad de colisiones en la red, lo que provocaría el aumento de paquetes perdidos y, a su vez, podría consumir una gran parte del ancho de banda disponible.
- b. El segundo escenario ocurre cuando existe un número reducido de vehículos en una determinada área. En esta situación, se debe aumentar la frecuencia de los mensajes periódicos de control, esto para tener identificados a los vehículos y a los vecinos de cada uno de ellos. Esto es importante para evitar la pérdida de paquetes debido a que un vehículo se encuentre fuera del rango de transmisión o recepción, y también para asegurarse de que los nuevos vehículos que se unan al área sean tomados como nodos activos en la red.

Estos escenarios nos llevan a configurar periódicamente los valores de los parámetros del protocolo OLSR y, para esto, se propone utilizar inteligencia artificial; en específico, la metaheurística ACO, la cual tiene la intención de determinar los valores de las métricas cada cierto período de tiempo para encontrar la configuración óptima. Para que la metaheurística encuentre esa configuración, se deben tomar en cuenta las métricas que se han mencionado en secciones anteriores, porque estos determinan el estado actual de la red y son fundamentales para evaluar si se tiene una buena o mala comunicación

Estas métricas de desempeño miden los siguientes elementos durante todo el tiempo de simulación del modelo de encaminamiento:

- a. PDR: Este valor se obtiene de la relación entre el número total de paquetes recibidos en los nodos destino y el número total de paquetes generados por los nodos fuente.

$$PDR = \frac{\text{No. total de paquetes recibidos}}{\text{No. total de paquetes generados}} \quad (4)$$

- b. MRL: Este valor se obtiene de la relación entre el número de paquetes enviados y el número de paquetes de datos recibidos (incluyendo los mensajes retransmitidos que se utilizan para llegar al nodo destino) [19].

$$MRL = \frac{\text{No. de paquetes enviados}}{\text{No. de paquetes de datos recibidos}} \quad (5)$$

- c. E2ED: Se obtiene de la suma de los diferentes tipos de retardo en cada enlace entre los nodos, los cuales son el retardo de transmisión d_{trans} , retardo de propagación d_{prop} , retardo de procesamiento d_{proc} y el retardo en la cola del buffer d_{que} , esto multiplicado por el número total de enlaces en la ruta N .

$$E2ED = N \times [d_{trans} + d_{prop} + d_{proc} + d_{que}] \quad (6)$$

Tomando en cuenta estas métricas, se propone una ecuación de aptitud que nos indica el estado actual de la comunicación entre los nodos de la red. La ecuación de aptitud es:

$$f_{cost} = w_1 \times (-PDR) + w_2 \times MRL + w_3 \times E2ED \quad (7)$$

Esta función busca maximizar el PDR, por lo que se utiliza el signo negativo y para el caso del MRL y el E2ED se utiliza el signo positivo para minimizar los valores de estas métricas. Además, en la ecuación se tienen las variables w_1 , w_2 , w_3 que en [31] se menciona que son pesos utilizados para equilibrar la influencia de cada métrica en el valor de aptitud resultante y, por tanto, deciden utilizar diferentes pesos sesgados constantes para dar prioridad al PDR sobre los otros dos. Para este trabajo, se hacen pruebas con valores de pesos constantes, en este caso $w_1 = 0.5$, $w_2 = 0.2$ y $w_3 = 0.3$.

6. Análisis de resultados

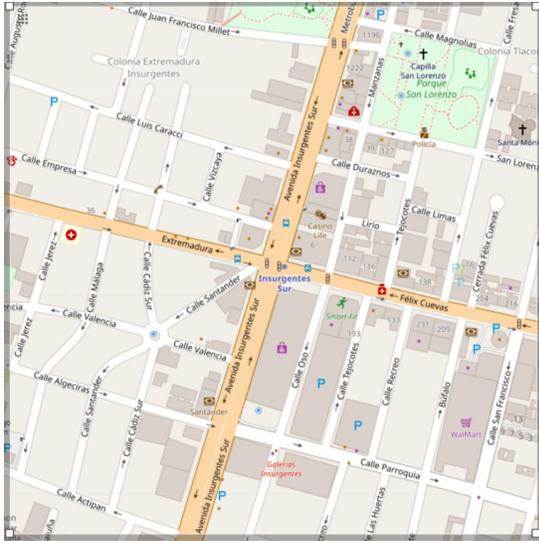
En esta sección, se evalúa el protocolo de encaminamiento V-ACO-OLSR que se planteó y se diseñó en las dos secciones anteriores. Para esto, se presentan las características del escenario general, los resultados obtenidos tomando en cuenta las métricas de desempeño y un análisis de rendimiento que se obtiene en cada escenario.

6.1. Escenario general

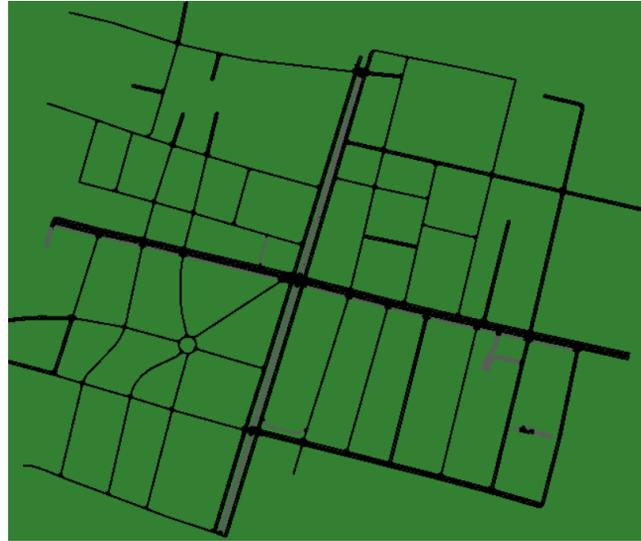
Para evaluar el desempeño del protocolo V-ACO-OLSR, se proponen distintas pruebas variando la densidad de los vehículos para analizar la red bajo condiciones cada vez más complejas y observar su comportamiento. Sin embargo, estos escenarios cuentan con elementos y parámetros que se utilizan en cada una de estas simulaciones, los cuales se describen a continuación.

6.1.1. Configuración del área de simulación

Para generar el área de simulación, se utiliza la herramienta OpenStreetMap para obtener un escenario que se acerque a la realidad. La zona seleccionada que se muestra en la figura 7, es una región de aproximadamente $750\text{ m} \times 750\text{ m}$ que contiene vehículos que pueden ir desde los 20 hasta los 100 circulando aleatoriamente por las calles de la zona sur de la Ciudad de México. Es importante destacar que se seleccionaron estas características del área con el propósito de crear un escenario lo más similar al trabajo con el cual se está haciendo la comparación. En la figura 7a, se observa el área desde OpenStreetMap, esta cuenta con las características necesarias para probar el protocolo de encaminamiento debido a que es un entorno urbano, según las propiedades que se mencionan en la sección 2.2. En la figura 7b, se observa la misma zona vista desde SUMO, esta herramienta extrae los datos necesarios y hace el proceso para crear el escenario con las mismas características y dimensiones del área original.



(a) Selección del área desde OpenStreetMap



(b) Selección del área desde SUMO

Figura 7: Área de simulación

Al hacer ese proceso, el tiempo total de simulación del movimiento de los vehículos es de aproximadamente 420s. Sin embargo, se debe evitar hacer pruebas al inicio y al final, ya que en ese período los vehículos están prácticamente detenidos debido a que aún no han comenzado su recorrido o ya lo han finalizado. Además, SUMO no elimina automáticamente estos vehículos cuando terminan su recorrido y su presencia puede afectar el rendimiento de la red en determinados momentos. Durante todo el tiempo de simulación, los vehículos ingresan de manera aleatoria en cualquier momento y vía, con una velocidad máxima de 40 km/h , mientras envían y reciben paquetes.

6.1.2. Configuración de los parámetros de OLSR

Para el caso de los parámetros de OLSR, al inicio de la simulación se tienen los valores predeterminados que se mencionan en la subsección 4.2.2. Después de 50 ms , comienza el trabajo de la metaheurística ACO de evaluar el desempeño de la red mediante las tres métricas de desempeño y, en el caso en que se encuentren en uno de los dos escenarios críticos que se mencionan en la subsección 5.3, los valores de OLSR deberán aumentar o disminuir dependiendo de la cantidad de vehículos activos presentes en ese momento en la red. De tal manera que se busca ajustar los s que tienen un gran impacto en el desempeño de la red y,

es por ello, que se usa ACO para actualizarlos en el caso de que sea necesario.

Como se había mencionado anteriormente, NS-3 cuenta con el módulo de OLSR y con todos los parámetros que se mencionan en la tabla 10, sólo es necesario crear funciones para obtenerlos y establecerlos con funciones ‘set’ y ‘get’. Esto se puede encontrar en el archivo ‘olsr-routing-protocol’ de la biblioteca del simulador. Al desarrollar algunas pruebas notamos que disminuir o aumentar mucho estos valores puede provocar problemas en la simulación de la red, por lo que se debe fijar un límite superior e inferior.

Tabla 10: Límites de los parámetros de OLSR.

Parámetros	Límite inferior	Límite superior
HELLO INTERVAL	1.0 s	30.0 s
REFRESH INTERVAL	1.0 s	30.0 s
TC INTERVAL	1.0 s	30.0 s
HNA INTERVAL	1.0 s	30.0 s
NEIGHB HOLD TIME	3.0 s	100.0 s
TOP HOLD TIME	3.0 s	100.0 s
MID HOLD TIME	3.0 s	100.0 s
DUP HOLD TIME	3.0 s	100.0 s
HNA HOLD TIME	3.0 s	100.0 s
WILLINGNESS	1	7

Los límites que se eligieron son los mismos que se utilizan en [19] porque se busca mantener las mismas condiciones para evaluar y comparar el desempeño de ambos trabajos. Otro aspecto que es importante tomar en cuenta, es qué tan rápido aumentan o disminuyen los valores cuando se está buscando mejorar el desempeño de la red, esto porque puede afectarlo en gran medida.

6.1.3. Configuración de la metaheurística ACO

En cuanto a la parte de optimización, se implementa y se configura la metaheurística optimización de colonias de hormigas en el simulador NS-3 recibiendo los valores de las tres métricas de desempeño. Para la simulación del protocolo de encaminamiento, ACO actualiza los valores críticos de OLSR cada 100 *ms* cuando es necesario, es decir; cuando se está teniendo una mala comunicación y se tiene un bajo desempeño de la red y, por lo tanto, en

el valor de la función de costo. Esta frecuencia con la que se utiliza la metaheurística es con la finalidad de que OLSR tenga el tiempo adecuado para procesar la información, actualizar los parámetros y encontrar a todos los vecinos que estén en ese momento y permita seleccionar el mejor camino hacia el nodo destino.

Para encontrar los valores más adecuados para OLSR, en el momento que comienza ACO entra en un proceso de búsqueda para obtener la configuración más adecuada en ese momento. Esta búsqueda consiste en repetir el algoritmo cierta cantidad de veces, la cual depende de dos variables, el número de hormigas y de iteraciones. La cantidad de veces que se repite el algoritmo es la multiplicación de estas dos variables, por lo que entre más grande sea, el algoritmo buscará soluciones a profundidad evitando máximos locales, es decir, valores que son considerados buenos, pero no son los mejor en ese momento.

Para el caso del protocolo de encaminamiento, realmente no se necesita encontrar el mejor resultado debido a la frecuencia con la que se evalúa el rendimiento de la red utilizando la metaheurística; sin embargo, se debe tratar de obtener un buen comportamiento y acercarse lo más posible a la mejor configuración. Es por ello que se decide utilizar 10 hormigas y 20 iteraciones para evitar posibles problemas de rendimiento. Por último, para el caso de α y β que se utilizan en la ecuación ‘regla de transición de estados aleatorios’, se configuran con un valor de 1, como se menciona en la parte teórica [29].

6.2. Resultados

Con base en lo anterior, se hacen las pruebas aumentando la cantidad de vehículos activos en la red para observar el desempeño del protocolo. Para estos escenarios, en la tabla 11 se presentan los parámetros generales que se usan en las pruebas.

Tabla 11: Parámetros de la simulación.

Configuración de la simulación	Datos de entrada
Área de simulación	750 m × 750 m
Número de nodos	20 hasta 100
Velocidad	30 km/h
Protocolo MAC	802.11p
Duración	360 s
Rango de transmisión	hasta 200 m
Tamaño del paquete	512 bytes

Cada una de estas simulaciones se repite 150 veces para contemplar la mayor cantidad de escenarios posibles en la red y obtener resultados más concretos debido a la aleatoriedad que se le agrega al protocolo de encaminamiento, tanto en la elección de nodo fuente o destino como de los valores de OLSR. A partir de todas las simulaciones llevadas a cabo, se calcula la media y el intervalo de confianza del 95 % (representado por una línea roja) para cada una de ellas. La figura 8, muestra el desempeño de la red respecto a la métrica del retardo de extremo a extremo.

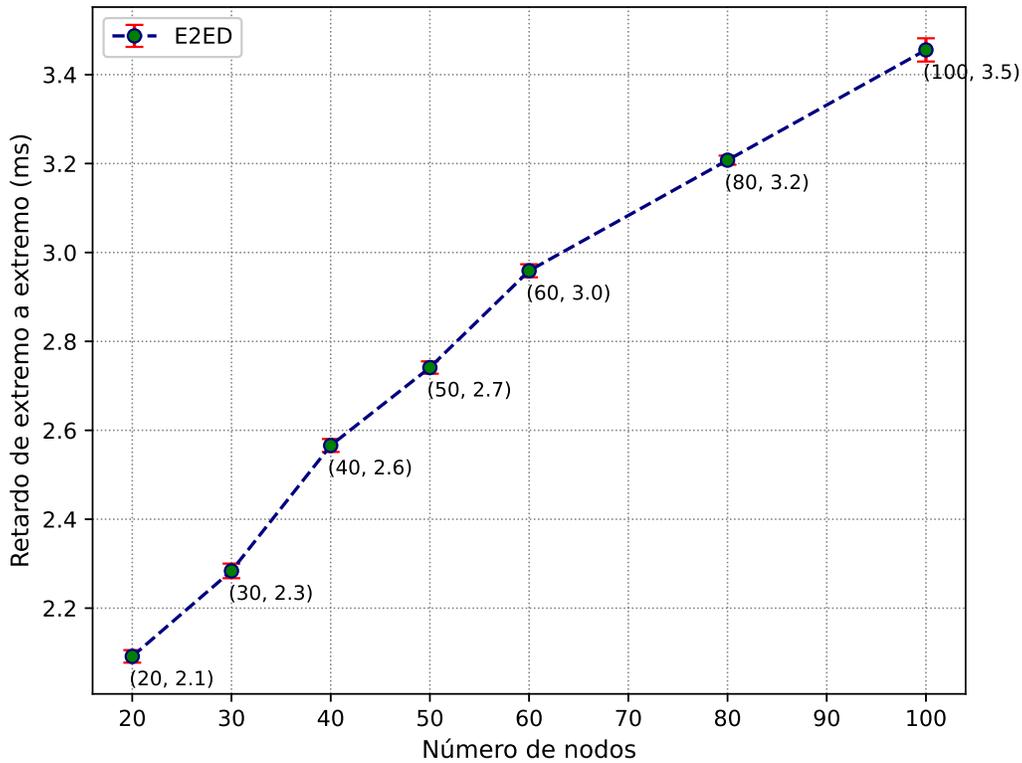


Figura 8: Retardo de extremo a extremo (ms).

Como se puede observar, cada uno de estos puntos con su respectiva coordenada representa el promedio del E2ED para cada una de las pruebas. Los resultados obtenidos se consideran bajos porque se logra disminuir en gran medida el tiempo para enviar un paquete del nodo fuente a destino. Además, se muestra que la diferencia al aumentar la cantidad de vehículos es de aproximadamente 0.2 ms lo que indica que si se sigue aumentando, no habrá un gran cambio y, por lo tanto, un mal desempeño de la red en el retardo de extremo a extremo. Respecto al intervalo de confianza, podemos analizar que cada una de estas pruebas presentan un comportamiento similar, lo que dice que no existe mucha variabilidad entre las pruebas de cada escenario.

Para el caso de la carga de encaminamiento media, en la figura 9 se muestra el comportamiento de la red en esta métrica.

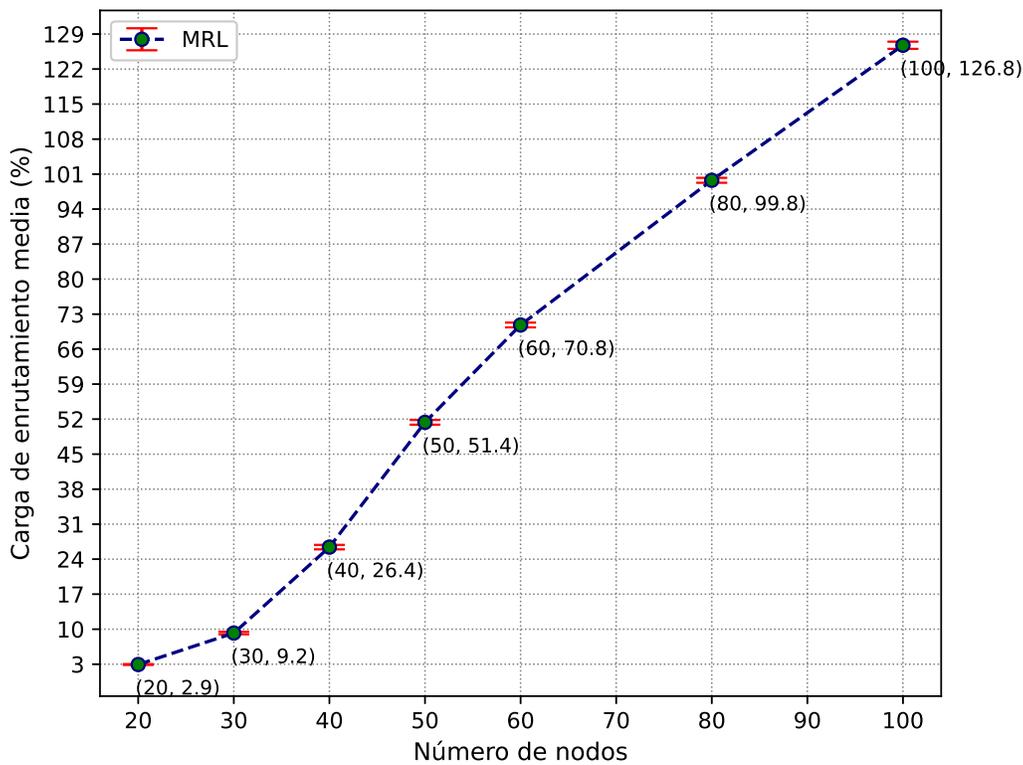


Figura 9: Carga de encaminamiento media.

En la Figura anterior observamos, de igual manera, los puntos con sus coordenadas de la media del MRL en cada una de sus pruebas. En el caso de esta métrica, los primeros

resultados muestran un bajo MRL debido a que la cantidad de nodos activos en la red es baja; sin embargo, al ir aumentándolo, se observa un mayor incremento en los resultados de las pruebas. Este comportamiento se puede considerar esperado porque al aumentar la cantidad de vehículos activos se tiene una mayor cantidad de opciones cuando se está enviando un paquete, por lo que va a ir incrementando significativamente el número de caminos posibles para reenviar un paquete al nodo destino y, por tanto, aumentará la cantidad de paquetes intermedios en cada mensaje enviado. Es evidente que se debe tener cuidado al incrementar abruptamente los vehículos de la red porque puede afectar mucho a esta métrica y llegar a consumir gran parte del ancho de banda de la red. Respecto al intervalo de confianza, se tiene un comportamiento similar que a la métrica anterior, lo que indica que los resultados obtenidos de cada una de las pruebas son muy similares entre sí.

Para el caso de la tasa de entrega de paquetes, en la figura 10 se muestra el desempeño de la red en esta métrica.

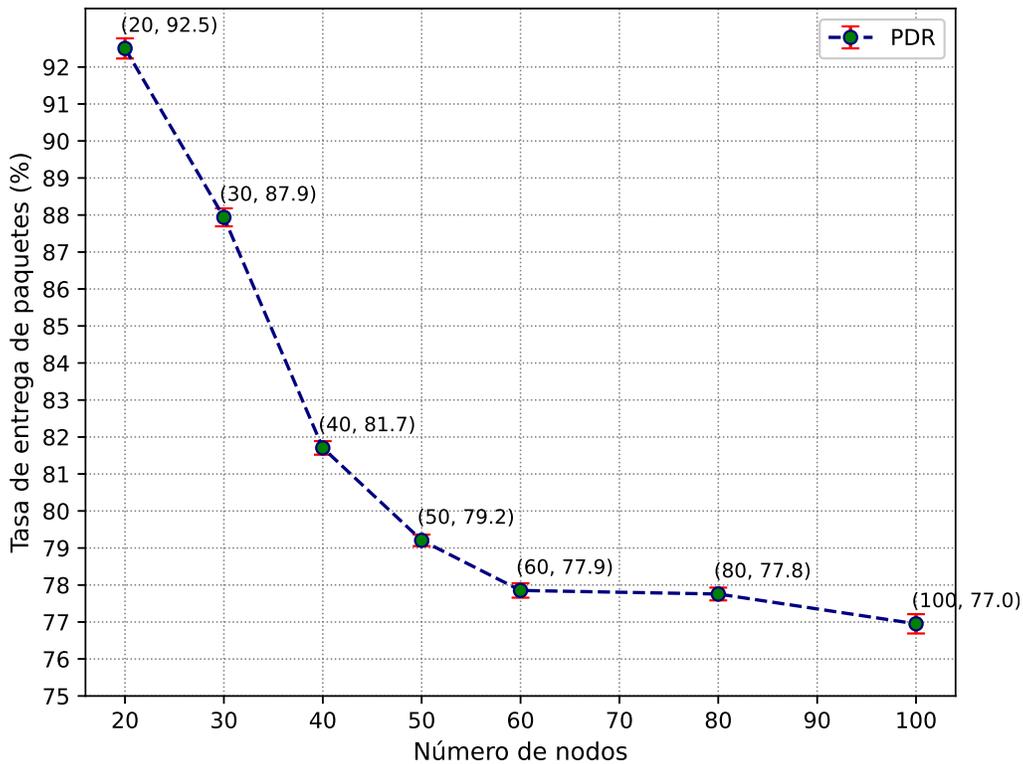


Figura 10: Tasa de entrega de paquetes (%)

En la Figura anterior se observa el promedio del PDR en las distintas pruebas de nodos activos. El desempeño que alcanza esta métrica al principio puede considerarse alto debido a que se logra un alto porcentaje de mensajes recibidos a los nodos finales elegidos. Posteriormente, al incrementar el número de vehículos activos, los resultados decrecen entre un 5 a 7% en las primeras tres pruebas y partir de la cuarta se puede observar que la pérdida comienza a ser mínima, lo que indica que alcanza una estabilidad en los valores del PDR aunque se incremente en cierta medida el número de nodos activos.

En el caso del intervalo de confianza, en las primeras pruebas se obtiene un intervalo mayor debido a que se presentan valores más dispersos de 5 a 10% entre simulaciones; sin embargo, en las últimas pruebas el intervalo se fue reduciendo entre 1 y 3% en su mayoría. Por ende, los valores que se tienen son más cercanos entre sí.

6.3. Análisis del rendimiento de la red

Las pruebas realizadas considerando la configuración variable del número de vehículos activos se hacen con el objetivo de evaluar el comportamiento de la red utilizando las tres métricas de desempeño y compararlas con el trabajo FA-OLSR realizado en [19]. Al incrementar el número de nodos, es evidente que el desempeño de la red va a ir decrementando; sin embargo, las pruebas demuestran que tanto el E2ED como el PDR alcanzan una mayor estabilidad, lo que indica que se puede alcanzar una gran cantidad de vehículos en la red y estas métricas podrán mantener un comportamiento estable, lo que es un buen indicio para el protocolo de encaminamiento. Para el caso del MRL, es evidente que entre mayor sea el número de nodos, el resultado de este atributo seguirá aumentando con el riesgo de saturar la red por la cantidad de paquetes retransmitidos. Por lo anterior, se debe tener un constante monitoreo de esta métrica para revisar su comportamiento y evitar que provoque un bajo desempeño de la red.

En tanto al desempeño de protocolo V-ACO-OLSR respecto a FA-OLSR del trabajo con el cual se está comparando, en las siguientes figuras se muestra una comparación de las tres métricas de desempeño.

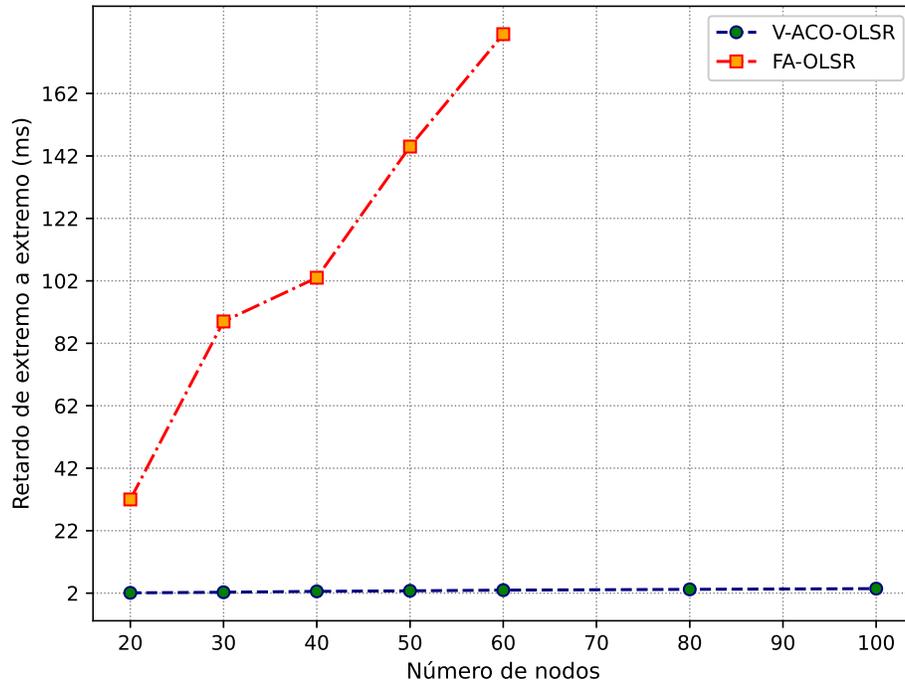


Figura 11: Comparación del E2ED entre V-ACO-OLSR vs FA-OLSR

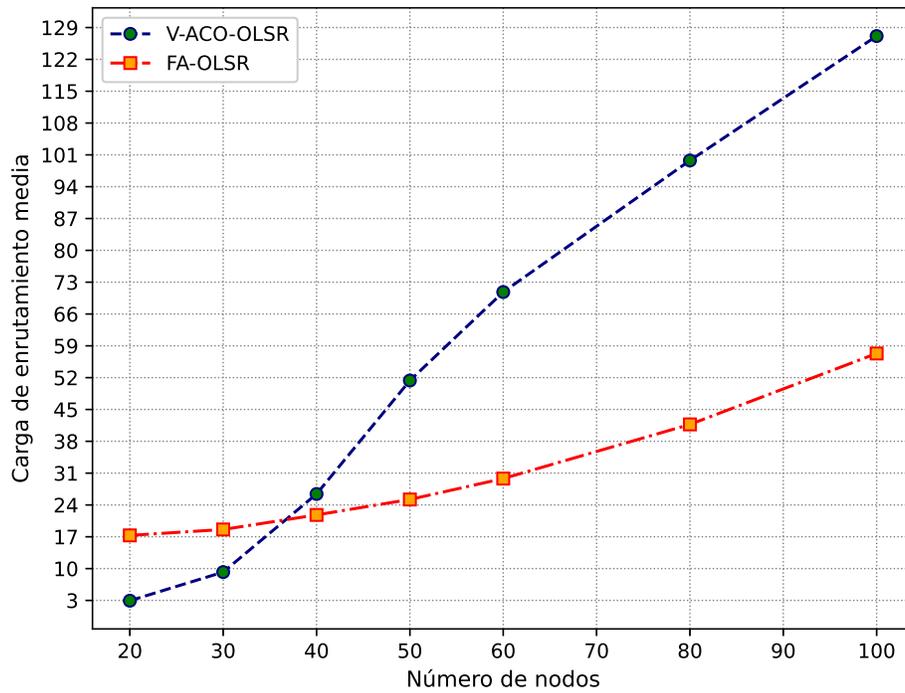


Figura 12: Comparación del MRL entre V-ACO-OLSR vs FA-OLSR

En la figura 11, para el caso del E2ED se logra mejorar en gran medida el desempeño de la red debido a que alcanza una media de $4ms$ con 100 nodos activos en la red, una medida mucho más baja respecto a FA-OLSR en el escenario de 60 nodos y tan es así que colocar los valores para una mayor cantidad de nodos no era necesario. Respecto al MRL, en la figura 12 se observa que el intervalo de 20 a 40 vehículos se obtienen buenos resultados; sin embargo, al incrementar el número de vehículos, se comienza a tener un crecimiento lineal en V-ACO-OLSR al paso de las pruebas. Lo anterior indica que si se sigue incrementando este atributo, el MRL tendrá un crecimiento similar que las últimas pruebas. Este comportamiento, respecto al trabajo en [19], se observa un incremento menos abrupto, por lo que en determinado momento se puede llegar a tener una gran diferencia respecto al MRL del protocolo V-ACO-OLSR.

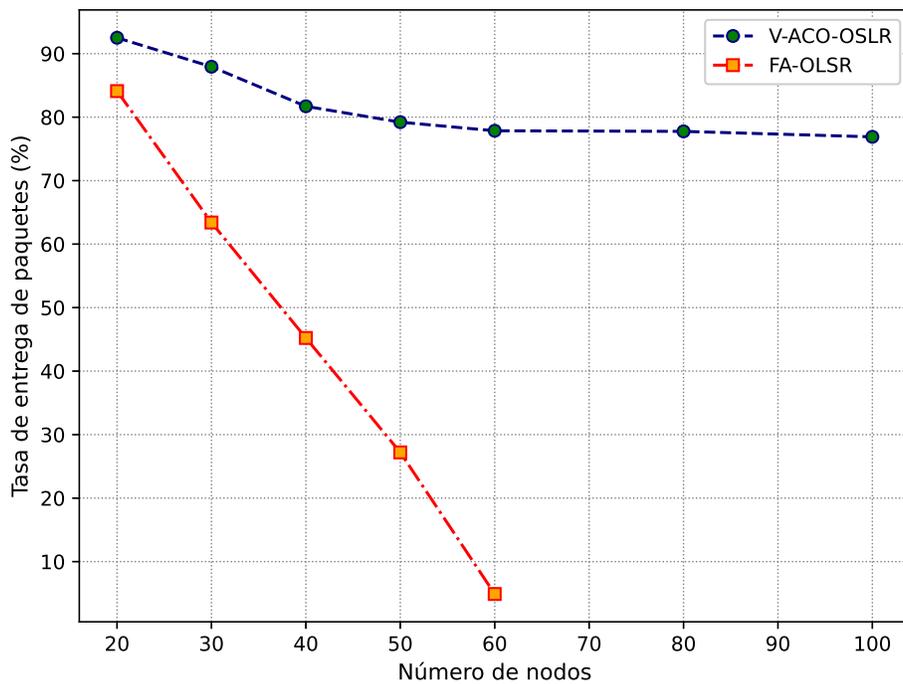


Figura 13: Comparación del PDR entre V-ACO-OLSR vs FA-OLSR

En la figura 13 se muestra la métrica del PDR, para el caso del protocolo FA-OLSR se muestra un menor rendimiento a medida que se aumenta los vehículos en la carretera. En la prueba de 20 nodos activos, su porcentaje es aproximadamente de 84 %, para 40 es de 45 % y para 60 se encuentra en un punto muy crítico. Estos resultados comparados con el protocolo

V-ACO-OLSR que alcanza una media de 77% entre el intervalo de 60 a 100 vehículos, obteniendo así una gran mejora respecto al protocolo con el que se está comparando, siendo así, una gran mejora respecto al protocolo FA-OLSR.

Cabe mencionar que el trabajo con el cual se está haciendo esta comparación solo mostraba resultados con hasta 40 vehículos activos en la red. Es por ello que se decidió utilizar el método de regresión polinomial para predecir los resultados para una mayor cantidad de nodos. Sin embargo, para el caso del E2ED y el PDR no fue necesario obtenerlos debido a que, a partir de 60 nodos activos, se obtuvieron valores críticos.

7. Conclusiones

En este trabajo, se ha desarrollado un protocolo de encaminamiento utilizando OLSR, el estándar 802.11p y la metaheurística ACO para crear una red vehicular V2V en un entorno urbano en la zona sur de la Ciudad de México. Para evaluar el desempeño de este protocolo se utilizaron las métricas de desempeño PDR, E2ED y MRL. Para corroborar al protocolo V-ACO-OLSR se desarrollaron pruebas aumentando la cantidad de nodos activos en la red, esto con el propósito de llevar al límite y analizar su comportamiento en la mayor cantidad de escenarios posibles debido a la aleatoriedad que se tiene.

Los resultados obtenidos de los diferentes escenarios muestran que se alcanzó un buen desempeño en general respecto a las tres métricas que se estaban utilizando, puesto que se alcanzó a reducir en gran medida los resultados en cada una de las pruebas realizadas respecto al trabajo de referencia. En particular, se alcanzó un mejor rendimiento en el PDR y E2ED porque en las últimas pruebas la diferencia que había entre ellas era mínima, lo que indica que si se sigue aumentando la cantidad de vehículos, los resultados no serán tan variables como al inicio de las pruebas. Para el caso del MRL, no se alcanzó el mismo comportamiento, esto porque se observó que entre mayor sea el número de nodos activos en un mismo espacio, este seguirá incrementándose porque habrá una mayor cantidad de nodos vecinos en la misma área.

De tal manera, las evaluaciones realizadas muestran que entre mayor sea la cantidad de vehículos activos, será más complicado obtener buenos resultados en las métricas de desempeño debido a los mensajes de control de OLSR. Sin embargo, contrario a otros trabajos que se encuentran en la literatura, podemos observar que se alcanza una estabilidad en el PDR y el E2ED a partir de 60 nodos en la red y, en el caso del MRL, sólo se debe tener constante monitoreo cuando se aumente la cantidad de nodos en una área pequeña porque puede llegar a congestionar la red y, por tanto, comiencen a retardarse los mensajes del nodo fuente al nodo destino o incluso puedan perderse.

Con base en los resultados obtenidos, en un posible trabajo a futuro, se puede buscar evaluar el protocolo en otro tipo de entornos para observar el comportamiento en cada uno

de estos escenarios y analizar su comportamiento. Una cosa que podría ayudar a obtener resultados que se acerquen aún más a la realidad es añadir elementos que se encuentren a lado de la vía que no permita el libre paso de la señal, como sería en un escenario real.

Referencias

- [1] “IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments,” *IEEE Std 802.11p-2010 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007 as amended by IEEE Std 802.11k-2008, IEEE Std 802.11r-2008, IEEE Std 802.11y-2008, IEEE Std 802.11n-2009, and IEEE Std 802.11w-2009)*, pp. 1–51, July 2010.
- [2] E. Spaho, L. Barolli, G. Mino, F. Xhafa, and V. Kolici, “VANET Simulators: A Survey on Mobility and Routing Protocols,” in *2011 International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications*, pp. 1–10, Oct. 2011.
- [3] P. Rajankumar, P. Nimisha, and P. Kamboj, “A comparative study and simulation of AODV MANET routing protocol in NS2 NS3,” in *2014 International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, pp. 889–894, Mar. 2014.
- [4] B. P. Maratha, T. R. Sheltami, and K. Salah, “Performance Study of MANET Routing Protocols in VANET,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 42, pp. 3115–3126, Aug. 2017.
- [5] F. Cunha, L. Villas, A. Boukerche, G. Maia, A. Viana, R. A. F. Mini, and A. A. F. Loureiro, “Data communication in VANETs: Protocols, applications and challenges,” *Ad Hoc Networks*, vol. 44, pp. 90–103, July 2016.
- [6] A. D. Devangavi and R. Gupta, “Routing protocols in VANET — A survey,” in *2017 International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon)*, pp. 163–167, Aug. 2017.
- [7] A. Bengag and M. El Boukhari, “Classification and comparison of routing protocols in VANETs,” in *2018 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV)*, pp. 1–8, Apr. 2018.

- [8] “IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) Architecture,” *IEEE Std 1609.0-2019 (Revision of IEEE Std 1609.0-2013)*, pp. 1–106, Apr. 2019.
- [9] S. Azadm, A. Rahman, and F. Anwar, “A Performance Comparison of Proactive and Reactive Routing Protocols of Mobile Ad-hoc Network (MANET),” *Journal of Engineering and Applied Sciences*, pp. 1–6, Jan. 2007.
- [10] T. S. Chouhan and R. S. Deshmukh, “Analysis of DSDV, OLSR and AODV Routing Protocols in VANETS Scenario: Using NS3,” in *2015 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)*, pp. 85–89, Dec. 2015.
- [11] E. E. Akkari Sallum, G. dos Santos, M. Alves, and M. M. Santos, “Performance analysis and comparison of the DSDV, AODV and OLSR routing protocols under VANETs,” in *2018 16th International Conference on Intelligent Transportation Systems Telecommunications (ITST)*, pp. 1–7, Oct. 2018.
- [12] M. Rajhi, H. Madkhali, and I. Daghri, “Comparison and Analysis Performance in Topology-Based Routing Protocols in Vehicular Ad-hoc Network (VANET),” in *2021 IEEE 11th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, pp. 1139–1146, Jan. 2021.
- [13] K. Ramneet, K. Navdeep, and S. Satwinder, “Analysis of Optimization Parameters of OLSR Protocol for VANETs,” *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, vol. 8, pp. 1–6, Jan. 2019.
- [14] K. Rana, S. Tripathi, and R. Raw, “Fuzzy Logic-Based Directional Location Routing in Vehicular Ad Hoc Network,” *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, vol. 91, Oct. 2019.
- [15] F. Kong and J. Tan, “A collaboration-based hybrid vehicular sensor network architecture,” in *2008 International Conference on Information and Automation*, pp. 584–589, June 2008.

- [16] W. Nie, Y. Duan, V. C. Lee, and K. Liu, “Supporting Data Stream Analytical Processing in Vehicular Sensor Networks,” in *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, pp. 2127–2134, Oct. 2019.
- [17] Z. Shen, X. Zhang, and D. Yang, “Performance Analysis of Extended Sensor Sharing in Vehicular Ad Hoc Networks,” in *2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, pp. 1–2, Oct. 2018.
- [18] A. D. Masegosa, E. Osaba, J. S. Angarita-Zapata, I. Laña, and J. D. Ser, “Nature-inspired metaheuristics for optimizing information dissemination in vehicular networks,” in *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion, GECCO '19*, (New York, NY, USA), pp. 1312–1320, Association for Computing Machinery, July 2019.
- [19] C. J. Joshua and V. Varadarajan, “An optimization framework for routing protocols in VANETs: a multi-objective firefly algorithm approach,” *Wireless Networks*, July 2019.
- [20] Network Simulator 2 (NS-2), “Discrete Event Network Simulator, <https://www.isi.edu/nsnam/ns..>”
- [21] Network Simulator 3 (NS-3), “Discrete Event Network Simulator, <http://www.nsnam.org..>”
- [22] OMNeT++, “Discrete Event Simulator, <https://omnetpp.org..>”
- [23] Network Simulator (OPNET), “Optimum Network Simulator, <https://opnetprojects.com/opnet-network-simulator..>”
- [24] NetSim, “Network Simulator, <https://www.boson.com/netsim-cisco-network-simulator..>”
- [25] P. A. Lopez, M. Behrisch, L. Bieker-Walz, J. Erdmann, Y.-P. Flötteröd, R. Hilbrich, L. Lücken, J. Rummel, P. Wagner, and E. Wiessner, “Microscopic Traffic Simulation

- using SUMO,” in *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 2575–2582, Nov. 2018.
- [26] BonnMotion, “A mobility scenario generation and analysis tool, <https://sys.cs.uos.de/bonnmotion/>.”
- [27] D. J. Calvachi Moreno, “Evaluación de la eficiencia del protocolo OLSR sobre redes MANET usando el simulador NS3,”
- [28] N. S. Rajput, R. Banerjee, D. Sanghi, G. Santhanam, and K. Singhal, “Swarm intelligence inspired meta-heuristics for solving multi-constraint QoS path problem in vehicular ad hoc networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 123, p. 102633, Dec. 2021.
- [29] M. Dorigo, M. Birattari, and T. Stutzle, “Ant colony optimization,” *IEEE Computational Intelligence Magazine*, vol. 1, pp. 28–39, Nov. 2006.
- [30] F. Smarandache, *Neutrosophic Sets and Systems, vol. 15/2017 (journal)*. Jan. 2017.
- [31] R. Chandren Muniyandi, M. K. Hasan, M. R. Hammoodi, and A. Maroosi, “An Improved Harmony Search Algorithm for Proactive Routing Protocol in VANET,” *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2021, p. e6641857, Feb. 2021.



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00105

Matrícula: 2202800344

Optimización del encaminamiento de mensajes en redes vehiculares.

En la Ciudad de México, se presentaron a las 13:00 horas del día 18 del mes de agosto del año 2023 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DR. MIGUEL LOPEZ GUERRERO
DR. RAFAEL AGUILAR GONZALEZ
DR. VICTOR MANUEL RAMOS RAMOS

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

MAESTRO EN CIENCIAS (CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN)

DE: ERICK ALEJANDRO PANTOJA TORRES

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

Aprobar

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



ERICK ALEJANDRO PANTOJA TORRES
ALUMNO

REVISÓ

MTRA. ROSALVA SERRANO DE LA PAZ
DIRECTORA DE SISTEMAS ESCOLARES

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBI

DR. ROMAN LINARES ROMERO

PRESIDENTE

DR. MIGUEL LOPEZ GUERRERO

VOCAL

DR. RAFAEL AGUILAR GONZALEZ

SECRETARIO

DR. VICTOR MANUEL RAMOS RAMOS