

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA**

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Proyecto técnico con enfoque investigativo:

“Simulación de protocolos de encaminamiento para la difusión de mensajes de alarma en redes vehiculares ad hoc mediante el uso de software libre”.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:

“Ingeniero Electrónico”.

Autor:

Paul Esteban Vintimilla Tapia.

Tutor:

Dr. Ing. Jack Fernando Bravo Torres.

Cuenca - 2016

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo Paul Esteban Vintimilla Tapia, con documento de identificación N° 0105739015, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado intitulado: “Simulación de protocolos de encaminamiento para la difusión de mensajes de alarma en redes vehiculares ad hoc mediante el uso de software libre”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Paul Esteban Vintimilla Tapia.

C.I. 0105739015

Cuenca, noviembre del 2016

CERTIFICACIÓN

Yo declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“SIMULACIÓN DE PROTOCOLOS DE ENCAMINAMIENTO PARA LA DIFUSIÓN DE MENSAJES DE ALARMA EN REDES VEHICULARES AD HOC MEDIANTE EL USO DE SOFTWARE LIBRE”**, realizado por **Paul Esteban Vintimilla Tapia**, obteniendo un **“Proyecto Técnico con enfoque investigativo”** que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jack Fernando Bravo Torres', written over a horizontal line.

Dr. Ing. Jack Fernando Bravo Torres.

C.I. 1103708697

Cuenca, noviembre del 2016

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Paul Esteban Vintimilla Tapia**, con número de cédula **0105739015**, autor del trabajo de titulación: **“SIMULACIÓN DE PROTOCOLOS DE ENCAMINAMIENTO PARA LA DIFUSIÓN DE MENSAJES DE ALARMA EN REDES VEHICULARES AD HOC MEDIANTE EL USO DE SOFTWARE LIBRE”**, certifico que el total contenido de este **“Proyecto Técnico con enfoque investigativo”** es de mí exclusiva responsabilidad y autoría.



Paul Esteban Vintimilla Tapia.

C.I. 0105739015

Cuenca, noviembre del 2016.

RESUMEN

Los sistemas de transporte han sido un pilar fundamental para el desarrollo de la sociedad, debido a que la movilidad es un requisito esencial para que un individuo realice eficientemente sus tareas cotidianas. El siguiente paso para mejorar el sistema de transporte es crear vehículos y caminos inteligentes que puedan comunicarse entre sí, dando lugar a los Sistemas de Transporte Inteligente (ITS). Debido a las características de movilidad de los vehículos, la mejor manera de implementar este tipo de comunicaciones es mediante redes ad hoc. Las redes ad hoc son redes que no se basan en una infraestructura existente para transmitir paquetes de datos, por lo que usan todos los nodos como clientes o routers. Las redes VANETs, son un tipo de redes pertenecientes a las MANETs, que permiten la comunicación entre vehículos. Por sus características de movilidad y topologías extensas, poseen sus propios protocolos de encaminamiento que permiten crear rutas entre sus nodos. Entre estos protocolos, se pueden encontrar los que se basan en la adición de una capa virtual al modelo TCP/IP de las VANETs, con la finalidad de emular un comportamiento estático en sus nodos, creando nodos virtuales. VNIBR es un protocolo que se fundamenta en la capa virtual. Su funcionamiento se basa en la transmisión de mensajes entre nodos virtuales, en donde, los procesos de encaminamiento se dan en las intersecciones de cada vía.

El presente proyecto se encuentra enfocado en el diseño de un protocolo de encaminamiento para la difusión de mensajes de alarma denominado VNIBR-E, el cual tiene como objetivo obtener el mínimo retardo posible dentro de una VANET. Para desarrollarlo, se aprovechó las ventajas que posee VNIBR y, con algunas modificaciones, se buscó obtener el comportamiento deseado. Estas modificaciones se basan en el concepto de no crear ni mantener rutas, ahorrando tiempo significativo. Se divide el área geográfica de la red en regiones y a cada región se le asigna un líder. La comunicación se da vía *unicast* entre los líderes de cada región de manera inmediata.

Para comprobar el rendimiento de VNIBR-E, se lo comparó con AODV y OLSR mediante simulaciones en un escenario de movilidad vehicular urbano. Estas simulaciones fueron desarrolladas en NS-3, conjuntamente con SUMO para obtener trazas de movilidad. Además, se configuraron parámetros en el escenario de simulación, que permitieron conseguir resultados apegados lo más posible a la realidad. Los resultados obtenidos demostraron el mayor rendimiento que posee VNIBR-E tanto, en retardo, como en *throughput*, en relación a los otros protocolos propuestos. Por este motivo, se garantiza que se cumplió con los objetivos planteados en este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Índice General | I |
| Índice de Figuras | III |
| Índice de Tablas | IV |
| Abreviaturas Utilizadas | V |
| Agradecimientos | VI |
| Dedicatoria | VII |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Justificación | 2 |
| 1.2. Sistemas de transporte Inteligente (ITSs) | 2 |
| 1.2.1. Aplicaciones de los ITSs | 3 |
| 1.2.2. Beneficios de los ITSs | 6 |
| 1.3. Seguridad Vial | 7 |
| 1.4. Objetivos de este proyecto | 8 |
| 1.4.1. Objetivo General | 8 |
| 1.4.2. Objetivos Específicos | 9 |
| 2. Estado del Arte | 10 |
| 2.1. Redes Vehiculares Ad hoc (VANETs) | 11 |
| 2.1.1. Arquitectura de VANETs | 11 |
| 2.1.2. Características de VANETs | 12 |
| 2.1.3. Aplicaciones de VANETs | 13 |
| 2.2. Protocolos de enrutamiento para VANETs | 15 |
| 2.2.1. Protocolos basados en la posición | 15 |
| 2.2.2. Protocolos basados en la topología | 16 |
| 2.2.3. Protocolos basados en <i>broadcast</i> | 21 |
| 2.2.4. Protocolos basados en clústers | 22 |
| 2.2.5. Protocolos basados en la difusión geográfica | 23 |
| 2.3. Capa de nodo virtual (VNLayer)..... | 23 |
| 2.3.1. VaNetLayer | 25 |
| 2.3.2. <i>Intersection-Based Routing on Virtual Nodes Protocol</i> (VNIBR) | 29 |
| 2.4. Herramientas de simulación..... | 32 |
| 2.4.1. Network Simulator 3 (NS-3) | 33 |
| 2.4.2. Simulador de Movilidad Urbana (SUMO) | 33 |
| 3. Diseño de un protocolo de encaminamiento para la difusión de mensajes de alarma: VNIBR-E | 34 |
| 3.1. Diseño del protocolo | 34 |
| 3.1.1. Cabecera de VNIBR-E | 35 |
| 3.1.2. Funcionamiento de VNIBR-E | 36 |

| | |
|----------------------------------------------------|-----------|
| 4. Análisis de Resultados | 39 |
| 4.1. Métricas de simulación | 39 |
| 4.2. Escenario de simulación..... | 40 |
| 4.3. Análisis de resultados | 43 |
| 4.3.1. Retardo | 43 |
| 4.3.3. <i>Throughput</i> | 45 |
| 5. Conclusiones y trabajo futuro..... | 47 |
| 5.1. Conclusiones sobre el retardo | 47 |
| 5.2. Conclusiones sobre el <i>throughput</i> | 48 |
| 5.3. Trabajo futuro | 49 |
| Referencias Bibliográficas | 50 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Figura 1. Tipos de comunicación en una VANET</i> | <i>12</i> |
| <i>Figura 2. Funcionamiento del protocolo OLSR mediante MPRs</i> | <i>18</i> |
| <i>Figura 3. Descubrimiento de ruta entre el nodo A y C en AODV</i> | <i>20</i> |
| <i>Figura 4. Funcionamiento de protocolos basados en clústers</i> | <i>22</i> |
| <i>Figura 5. Clasificación de los protocolos de enrutamiento para VANETs</i> | <i>23</i> |
| <i>Figura 6. Modelo TCP/IP con VNLayer.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Figura 7. Ejemplo de VNLayer.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Figura 8. Mejoras que presenta la VaNetLayer</i> | <i>26</i> |
| <i>Figura 9. Encabezado de los paquetes de la VaNetLayer</i> | <i>27</i> |
| <i>Figura 10. Algoritmo para la elección de un líder en la VaNetLayer</i> | <i>28</i> |
| <i>Figura 11. Modelo TCP/IP con VaNetLayer y VNIBR.....</i> | <i>30</i> |
| <i>Figura 12. División del área geográfica de la VANET basándose en VNIBR</i> | <i>30</i> |
| <i>Figura 13. Modelo TCP/IP de VNIBR-E.....</i> | <i>35</i> |
| <i>Figura 14. Cabecera de un paquete VNIBR-E.....</i> | <i>35</i> |
| <i>Figura 15. Diagrama de flujo del funcionamiento de VNIBR-E</i> | <i>37</i> |
| <i>Figura 16. Situación de emergencia: funcionamiento de VNIBR-E.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Figura 17. Escenario vehicular implementado.....</i> | <i>41</i> |
| <i>Figura 18. Retardo.....</i> | <i>44</i> |
| <i>Figura 19. Throughput.....</i> | <i>46</i> |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Tabla 1. Parámetros del escenario de simulación.....</i> | <i>42</i> |
| <i>Tabla 2. Resultado de retardo en el peor y mejor escenario</i> | <i>48</i> |
| <i>Tabla 3. Resultado de throughput los peores escenarios de simulación</i> | <i>49</i> |

ABREVIATURAS UTILIZADAS

| | |
|----------------|-----------------------------------------------------------------|
| AODV | <i>On-demand Distance Vector Routing</i> |
| AU | <i>Unidad de aplicación</i> |
| ITS | <i>Sistema de transporte inteligente</i> |
| L1VN | <i>Entidad de nivel 1</i> |
| L2VN | <i>Entidad de nivel 2</i> |
| L3VN | <i>Entidad de nivel 3</i> |
| MANET | <i>Red móvil ad hoc</i> |
| MPR | <i>Multi-Point Relay</i> |
| NS-3 | <i>Network Simulator 3</i> |
| OBU | <i>Unidad a bordo</i> |
| OLSR | <i>Optimized Link State Routing</i> |
| PN | <i>Nodo físico</i> |
| RERR | <i>Route Error</i> |
| RREP | <i>Route Reply</i> |
| RREQ | <i>Route Request</i> |
| RSU | <i>Unidad de borde carretera</i> |
| SUMO | <i>Simulador de movilidad urbana</i> |
| TC | <i>Topology Control</i> |
| V2I | <i>Vehículo a infraestructura</i> |
| V2V | <i>Vehículo a vehículo</i> |
| VANET | <i>Red vehicular ad hoc</i> |
| VN | <i>Nodo virtual</i> |
| VNIBR | <i>Intersection-Based Routing on Virtual Nodes Protocol</i> |
| VNIBR-E | <i>VaNetLayer Intersection-Based Routing Emergency Protocol</i> |
| VNLayer | <i>Capa de nodo virtual</i> |
| WAVE | <i>Wireless Access Vehicular Environment</i> |
| WHO | <i>Organización Mundial de la Salud</i> |
| ZOF | <i>Zona de reenvío</i> |
| ZOR | <i>Zona de relevancia</i> |

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que me brindaron su mano cuando más lo necesite. A mi tío Paulo, por ser como un padre para mí, sin el cual este proyecto no se hubiera realizado; a mi tía Isabel y a mi padrino Juan, por brindarme su ayuda en el momento oportuno; a mi abuelita Mariana, mi segunda mamá, y a mi tía María, por todas las palabras de aliento y su apoyo incondicional; a mi abuelito Nelson, sencillamente por ser uno de mis ejemplos a seguir; a Christian, por ser más que un amigo, un hermano.

Quiero expresar un agradecimiento especial a los señores Ing. Jack Bravo, Ing. Patricio Reinoso e Ing. Esteban Ordóñez, por la tutela y el seguimiento que me han brindado durante el desarrollo de este proyecto.

Finalmente, detrás de cada gran hombre, existe una gran mujer. Gracias Andre por ser mi gran mujer, lo que siempre necesite y por quien nunca me rendiré.

Paul Esteban Vintimilla Tapia.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo de manera especial a mi madre, Claudia. Todo tu esfuerzo desde hace 23 años valió la pena, llegó tu momento de ser feliz.

Además, espero que esto sirva como inspiración para mis hermanos: Josué y Emmanuel, y mis primas: Viviana, Doménica y Aileen. Todo en la vida es posible cuando uno se lo propone de corazón. Siempre existirán adversidades que no nos permiten “ser felices”, pero esas adversidades nos ayudan a crecer y luchar por cumplir con nuestros sueños.

Paul Esteban Vintimilla Tapia.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La movilidad es un requisito esencial para el desarrollo de cualquier tipo de sociedad. Sin movilidad, la vida cotidiana de una persona se ve limitada de una manera importante, debido a que la mayoría de empleos no se encuentran en zonas cercanas a los hogares y no se podrían realizar de una manera óptima actividades simples como salir de compras o socializar con otros individuos [1][2]. Los sistemas de transporte han evolucionado desde los carruajes hasta los vehículos actuales para dar soporte a la seguridad y movilidad eficiente. El siguiente paso para mejorar el sistema de transporte es crear vehículos y caminos inteligentes que puedan comunicarse entre sí, dando lugar a los Sistemas de Transporte Inteligente (ITS). Esta tecnología permitirá encontrar soluciones a problemas comunes como congestión vehicular, accidentes de tránsito, monitoreo de las vías, controles de velocidad y el cumplimiento de la ley por parte de los conductores [3]. Por las características de movilidad de los vehículos, la mejor opción para establecer comunicación entre los elementos de un ITS es la implementación de redes ad hoc.

Las redes ad hoc son redes que no se basan en una infraestructura existente para transmitir y retransmitir paquetes de datos, por lo que usan todos los nodos como clientes o routers. De esta forma, no se requiere ningún tipo de punto de acceso o routers pre-instalados en la red [4]. Uno de los temas más interesantes en este campo son las Redes Ad hoc Vehiculares (VANETs). Las VANETs son redes pertenecientes a las Redes Móviles Ad hoc (MANET) y son parte de los ITSs. Están constituidas por vehículos, los cuales permiten formar nodos físicos móviles para realizar comunicaciones vehículo a vehículo (V2V) o vehículo a infraestructura (V2I) y así obtener beneficios de un sinnúmero de aplicaciones [5].

V2V y V2I son las formas de comunicación más utilizadas dentro de una VANET, ya que permiten la rápida difusión de mensajes de alarma. En ambos casos, un servidor se encarga de realizar el *broadcasting* de mensajes a un centro de emergencias [6]. Otra forma de realizar la comunicación y difusión de mensajes es a través de nodos virtuales (VN). Estos nodos permiten implementar sistemas con movilidad predeterminada, por lo que se pueden desarrollar aplicaciones para VANETs con mejores características [7].

Un VN es un nodo abstracto que se mueve de manera predefinida para cubrir una cierta región [8]. La idea es que los nodos físicos móviles (PN) colaboren para emular VNs que permanecen

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

en ubicaciones conocidas, pudiendo ser direccionados como servidores estáticos. El área geográfica de una VANET se divide en regiones cuadradas, cuyo tamaño es elegido de manera que cada PN pueda mantener comunicación con cada PN en su región y con los PN de las regiones vecinas. Cada VN es emulado por los PNs de la región correspondiente. Un PN en cada región es escogido como líder y es el encargado de la recepción de paquetes, almacenándolos y enviándolos para establecer una comunicación. Mientras tanto, un conjunto de no líderes trabaja como backups para mantener réplicas de la información que maneja el líder. Entonces, los VNs pueden mantener un estado persistente, aunque un PN individual falle o haya dejado la región, siempre y cuando exista al menos un PN en la región correspondiente [9].

1.1. Justificación

Según la Organización Mundial de la Salud (WHO), el informe anual de seguridad vial dice que cerca de 1.24 millones de personas se ven afectadas por un accidente de tránsito cada año [10]. Estas estadísticas indican que una gran cantidad de accidentes viales son causados por decisiones incorrectas de conductores que no pueden anticipar condiciones peligrosas en las carreteras [11]. Cada conductor conoce una situación de emergencia, entonces en el caso de que se haya producido algún incidente sabe cómo reaccionar, pero, casi siempre, existe una reacción tardía o incorrecta que puede agravar dicha situación [12]. Por tal motivo, es necesario encontrar una forma de evitar este problema.

La forma más fácil de evitar este tipo de accidentes, es mediante un mensaje de alarma que llegue a todos los conductores que puedan resultar implicados, emitido por el vehículo que detectó la emergencia. Los vehículos que reciban el mensaje deben reenviarlo dentro de un área cercana. Este mensaje debe ser transmitido durante un tiempo limitado para garantizar la eficiencia del sistema [11]. Por lo tanto, la difusión de mensajes de alarma en un conjunto de vehículos dentro de una misma zona es de vital importancia para garantizar la seguridad vial.

1.2. Sistemas de transporte inteligente (ITSs)

Los ITSs se basan en las crecientes demandas del desarrollo del transporte. Integran tecnologías de la información y de la comunicación, más hardware, para construir un sistema inteligente compuesto por conductores, caminos y vehículos. Permiten establecer un sistema

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

de gestión de transporte eficiente y funcional en tiempo real, consiguiendo un cambio de enfoque de servicios viales a servicios de usuario [13][14]. Emplean tecnología avanzada para proveer a los conductores información y servicios que permitan reducir la congestión e incrementar la capacidad vial [13].

Se han desarrollado un sinnúmero de aplicaciones en el ámbito de los ITSs. Varias de estas aplicaciones están enfocadas principalmente en aumentar la comodidad durante la conducción y la seguridad vial [14].

1.2.1. Aplicaciones de los ITSs

Las aplicaciones de los ITSs pueden ser clasificadas como aplicaciones de seguridad vial, aplicaciones de gestión y eficiencia de tráfico, y aplicaciones de información y entretenimiento [15].

a) Aplicaciones de seguridad vial

Las aplicaciones de seguridad vial son aquellas que se emplean para disminuir la probabilidad de accidentes de tráfico y las pérdidas de vida de los ocupantes de un vehículo [16][17]. Brindan información y asistencia a los conductores para evadir colisiones, mediante el intercambio de información con las RSUs. Dicha información puede representar la posición y velocidad del vehículo, la posición de una intersección y la distancia entre vehículos; también puede utilizarse para localizar lugares peligrosos en las vías, como zonas resbaladizas o baches [15]. Algunos ejemplos de estas aplicaciones se muestran a continuación [15][16][17][18]:

- **Alerta de colisión en intersección:** permite evitar colisiones en intersecciones mediante la cooperación entre vehículos y RSUs.
- **Asistencia de cambio de carril:** permite reducir el riesgo de colisiones para los vehículos que están cambiándose de carril sin una visión adecuada.
- **Alerta por adelantamiento:** tiene como objetivo evitar colisiones en maniobras de adelantamiento.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

- **Alerta de colisión frontal:** permite reducir el riesgo de colisiones frontales, mediante el envío de alertas a vehículos que viajan en direcciones opuestas.
- **Alerta de colisión trasera:** permite reducir el riesgo de una colisión trasera mediante el envío de alertas a vehículos que se encuentren próximos.
- **Alerta cooperativa de colisión hacia adelante:** permite prevenir un accidente ocasionado por una colisión hacia adelante, mediante cooperación entre vehículos o asistencia hacia el conductor por parte de la RSU.
- **Alerta de vehículo de emergencia:** permite que un vehículo de emergencia activo, informe a vehículos próximos sobre su presencia, para que se tomen las precauciones necesarias.
- **Alerta/detección de una colisión:** en este caso, se considera que un accidente es inevitable. Los vehículos y las RSUs disponibles comparten periódicamente información para predecir posibles colisiones. Esta información incluye datos de posición detallados y el tamaño de los vehículos involucrados.
- **Asistencia cooperativa de cruce:** los vehículos involucrados en un cruce cooperan entre sí, con ayuda de las RSUs, para evitar colisiones.
- **Luces de freno de emergencia electrónico:** permite informar cuando un vehículo ha tenido que frenar de manera imprevista.
- **Alerta de invasión de vía:** permite informar cuando un vehículo está en una vía siguiendo el sentido contrario a la dirección establecida.
- **Alerta de vehículo detenido:** permite informar cuando cualquier vehículo se encuentra inhabilitado, debido a un accidente, avería u otro motivo.
- **Alerta sobre cambios de tráfico:** permite informar sobre cambios rápido del tráfico, detectados por cualquier vehículo.
- **Advertencia de violación de una señal de tránsito:** una o más RSUs detectan una violación de las señales de tráfico por parte de un conductor.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

- **Alerta de riesgo de colisión:** una RSU detecta un riesgo de colisión entre dos o más vehículos que no tienen la capacidad de comunicarse y avisa a todos los vehículos próximos.
- **Notificación de ubicación peligrosa:** cualquier RSU alerta a uno o varios vehículos sobre lugares peligrosos en la vía, tales como un obstáculo, una obra en construcción o secciones resbaladizas.

b) Aplicaciones de gestión y eficiencia de tráfico

Estas aplicaciones se centran en mejorar el flujo, la coordinación y la asistencia del tráfico, proporcionando información local, mapas actualizados y, en general, mensajes de relevancia delimitados en tiempo y espacio. Dichas aplicaciones se dividen en dos grupos conocidos como control de la velocidad y navegación cooperativa [19].

- **Control de la velocidad:** las aplicaciones de gestión de velocidad tienen como objetivo ayudar al conductor a controlar la velocidad de su vehículo para conseguir una conducción suave, evitando así cualquier problema mecánico [19].
- **Navegación cooperativa:** este tipo de aplicaciones se utilizan para aumentar la eficiencia del tráfico mediante gestión de la navegación por medio de la cooperación vehículo-vehículo y vehículo-RSUs [19].

c) Aplicaciones de información y entretenimiento

Las aplicaciones de información y entretenimiento se enfocan en mejorar la experiencia de los pasajeros que acompañan al conductor. Se basan en la reproducción de contenidos multimedia, así como, el desarrollo de actividades inter-vehiculares. Pueden agruparse en aplicaciones de servicios cooperativos locales y aplicaciones de servicios globales de internet [20].

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

- **Servicios cooperativos locales:** Este tipo de aplicaciones se centran en la información y entretenimiento que se puede obtener de servicios locales como: puntos de interés de pasajeros, comercio electrónico local y descarga de contenidos multimedia e información [19][20].
- **Servicios globales de internet:** Se enfocan en la descarga de contenidos multimedia e información que se puede obtener de los servicios de Internet a nivel mundial [20].

1.2.2. Beneficios de los ITSs

Los ITSs proporcionan beneficios que se encuentran centrados en la seguridad vial, el manejo eficiente del tráfico y el entretenimiento del usuario, al igual que las aplicaciones que se han desarrollado. A continuación, se expondrán los beneficios presentes en este tipo de tecnología.

a) Incremento de la seguridad

El principal motivo de uso de los ITSs es proveer a los usuarios seguridad en las vías. En los últimos años, la manera de conducción de las personas ha cambiado por diversos factores, sociales como tecnológicos, lo que ha ocasionado un incremento en los accidentes viales [21][22]. El uso de ITSs permite evitar y guiar al conductor ante cualquier situación, gracias al uso de alertas que lo ayudan a actuar de manera eficaz. Con esto, se consigue reducir el número de incidentes producidos [21][23].

b) Alerta de condiciones medioambientales

Los ITSs son capaces de alertar al conductor sobre cualquier condición medioambiental que pueda presentarse, gracias a sensores ambientales instalados a lo largo de la vía [21]. Los valores medidos por dichos sensores son procesados y guardados en una base de datos. Si el usuario se encuentra suscrito a este servicio podrá recibir alertas sobre las condiciones medioambientales de sus alrededores y un pronóstico del clima [24].

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

c) **Capacidad/Throughput**

Un beneficio importante de los ITSs es el hecho de poder manejar congestiones antes de que estas ocurran. El sistema mide el número de vehículos en cada carril y, en el caso de una posible congestión, toma la decisión de desviar todo el tráfico hacia otro carril. También, en el caso de que una congestión sea inevitable, envía mensajes de alerta a los usuarios para que tomen caminos alternos [17][21].

d) **Difusión de información**

A más de enviar mensajes de alerta sobre seguridad vial, condiciones ambientales y posibles congestiones, los ITSs son capaces de difundir información de cualquier tipo, ya sea contenido multimedia para entretenimiento, publicidad personalizada o algún hecho importante que este circulando como noticia nacional o internacional. De esta forma, se obtiene una mejor relación con cada usuario [16][21].

e) **Mejora de la movilidad y comodidad**

Los ITSs permiten mejorar la navegación satelital propia del vehículo y las aplicaciones que entregan información vial al usuario. Así, cada conductor puede comprobar el estado del tráfico y obtener la información que necesite sobre un lugar al que vaya a viajar, antes de salir de su casa [16][21].

1.3. Seguridad Vial

“Se refiere al conjunto de acciones, mecanismos, estrategias, y medidas orientadas a la prevención de accidentes de tránsito, o a anular o disminuir los efectos de los mismos, con el objetivo de proteger la vida de los usuarios” [25].

La pérdida de la salud es el efecto más grave de los accidentes de tránsito para la sociedad y para el conductor, ya que conduce tanto a un grave sufrimiento personal y enormes pérdidas sociales. Por tal motivo, este es el principal criterio en el que se enfoca la seguridad vial [26].

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Las acciones que se toman antes, durante y después de cada accidente influyen en las repercusiones en la salud de las personas involucradas. En su mayoría, estos incidentes son ocasionados por errores humanos no intencionales [23][26].

Existen tres formas básicas para reducir los errores humanos, las cuales se describen a continuación [26]:

1. Selección de los usuarios de la vía, es decir, elegir los usuarios que podrán circular por la vía.
2. Mejora del comportamiento de los usuarios en la vía, es decir, informar y educar a los usuarios sobre las leyes y normas de tránsito.
3. Adaptación de las carreteras y los vehículos mediante soluciones de ingeniería, es decir, implementar sistemas inteligentes que permitan mejorar la movilidad de los usuarios en la vía.

Los ITSs tienen el potencial para mejorar la seguridad en los aspectos mencionados. Con el uso de ITSs, se consigue [26]:

1. Controlar la exposición del usuario al tráfico de la vía.
2. Reducir la probabilidad de accidentes de tránsito.
3. Reducir las lesiones que puedan producirse en un accidente.

1.4. Objetivos de este proyecto

1.4.1. Objetivo General

Simular protocolos de encaminamiento para la difusión de mensajes de alarma en redes vehiculares ad hoc mediante software libre.

1.4.2. Objetivos Específicos

- **O.E.1.** Realizar el estudio del arte sobre los protocolos de encaminamiento para la difusión de mensajes de alarma en redes vehiculares.
- **O.E.2.** Diseñar un protocolo de encaminamiento basado en nodos virtuales para la difusión de mensajes de alarma.
- **O.E.3.** Implementar un ambiente de simulación para comprobar el rendimiento del protocolo diseñado.

El trabajo realizado se fundamenta y es parte del proyecto de investigación “*SPORANGIUM: A platform to support sporadic social networks based on ad-hoc communications and mobile cloud computing*”, realizado por los señores Ing. Esteban Ordóñez, Ing. Patricio Reinoso e Ing. Jack Bravo, perteneciente al Grupo de Investigación en Telecomunicaciones y Telemática (GITEL), de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS), Sede Cuenca.

Este documento se encuentra estructurado de la siguiente manera, en el Capítulo 2 se desarrolla el estado del arte que da sustento teórico a los protocolos implementados y las simulaciones realizadas; en esta sección se detalla principalmente los conceptos relacionados a VANETs y sus protocolos de encaminamiento. En el Capítulo 3, se describe el protocolo diseñado que trabaja sobre la capa virtual, denominado *VaNet Intersection-Based Routing Emergency Protocol* (VNIBR-E); se hace énfasis en su funcionamiento y sus principales características. En el capítulo 4, se detalla el escenario de simulación implementado con su respectiva configuración; además, se explica el proceso de simulación realizado y se analizan los resultados obtenidos. Finalmente, en el Capítulo 5, se habla sobre las conclusiones a las que se llegó con el análisis de resultados y los trabajos futuros que puedan desarrollarse en este campo.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

El creciente desarrollo tecnológico está dando paso al nacimiento de una sociedad interconectada. Así, se han desarrollado las denominadas redes VANETs, cuya finalidad es la conexión de vehículos dentro de la vía, es decir, crear una red vehicular. Las VANETs son el pilar fundamental para la implementación de ITSs, lo que ha conllevado al despliegue de un sinnúmero de aplicaciones que permitan garantizar una movilidad eficiente de conductores, pasajeros y peatones. Dentro de estas aplicaciones existe un grupo que se enfoca en velar por la seguridad vial y así, lograr reducir los accidentes de tránsito. Por estos motivos, la investigación de este campo es de vital importancia en el área de las telecomunicaciones.

Uno de los objetivos principales de las aplicaciones de seguridad vial, es la implementación de un protocolo de difusión de mensajes de alarma que permita informar a los usuarios sobre cualquier emergencia que pudiera darse en la vía. Cuando se habla de “emergencia”, obtener un tiempo mínimo de respuesta es lo más importante. Al analizar los tipos de enrutamiento en VANETs se pueden encontrar dos soluciones, la primera es el uso de enrutamientos típicos que trabajan sobre la pila de protocolos propios de una red ad hoc, y la segunda que maneja enrutamientos que trabajan sobre una capa virtual que se agrega a dicha pila de protocolos. Para implementar dicho protocolo se deben realizar estudios y simulaciones entre diferentes tipos de enrutamiento y conocer cuál es el que ofrece el mejor rendimiento.

Trabajar con simulaciones permite sacar conclusiones sobre técnicas existentes sin la necesidad de realizar una implementación física, consiguiendo así mejorar o desarrollar nuevas tecnologías que se adapten de una manera más eficiente a los requerimientos del usuario. Debido a esto, el fundamento teórico desarrollado en esta sección ayudará a comprender los protocolos de enrutamiento desarrollados hasta la fecha para la difusión de mensajes de alarma en VANETs y diseñar uno nuevo que trabaje en la capa virtual de las mismas.

Este capítulo está estructurado de la siguiente manera, en la sección 2.1 y 2.2 se analizan las VANETs y sus protocolos de enrutamiento, mientras que en la sección 2.3 se estudia la capa virtual que se implementa en una VANET. Finalmente, en la sección 2.4 se habla brevemente de las herramientas de simulación empleadas.

2.1. Redes Vehiculares Ad hoc (VANETs)

Las redes inalámbricas se forman cuando dispositivos se conectan entre sí mediante ondas de radio. Se dividen en dos tipos, redes basadas en infraestructura, cuyos dispositivos dependen de una conexión a un punto de acceso (Wi-Fi), y redes no basadas en infraestructura, cuyos dispositivos mantienen conexiones auto-organizadas (ad hoc) [27].

Las redes ad hoc, cuyos nodos se mueven de forma independiente, en diferentes direcciones con diferentes velocidades, son conocidas como Redes Móviles Ad hoc (MANETs). En estas redes cada nodo actúa como un router que mantiene diferentes rutas de acceso según el protocolo que use [27][28].

Las VANETs son un tipo especial de MANET, en las cuales los vehículos se convierten en los nodos de la red. Permiten la comunicación de un vehículo con otro y de varios vehículos con un RSU. Las conexiones entre los vehículos pueden mantenerse en un rango de 100 a 300m. Cuando un vehículo sale del área de cobertura y se desconecta de la red, otros vehículos pueden tomar su lugar, creando así, una red vehicular [27][28][29].

2.1.1. Arquitectura de VANETs

La comunicación en VANETs se consigue a través de un medio inalámbrico llamado WAVE (del inglés *Wireless Access Vehicular Environment*) [30]. Existen tres tipos de comunicación: vehículo a vehículo (V2V), vehículo a infraestructura (V2I) e híbrida. Los componentes principales son las unidades de carretera (RSU), las unidades a bordo (OBU) y las unidades de aplicación (AU). La OBU se conoce también como dispositivo de usuario ya que se instala sobre los vehículos para acceder a los servicios que proporciona el RSU. Las RSUs almacenan aplicaciones que prestan servicios, por lo que se las conoce como proveedores. Las AUs utilizan las aplicaciones que provee la RSU mediante la OBU [31].

La comunicación V2V se da entre dos vehículos equipados con OBUs, lo que permite el intercambio de mensajes. En cambio, la comunicación V2I se da entre un vehículo y una red inteligente preexistente compuesta por RSUs. Finalmente, en una comunicación híbrida, un vehículo se comunica con una RSU dando varios saltos a través de diferentes OBUs [32]. En la Figura 1, se pueden observar los tipos de comunicación en una VANET.

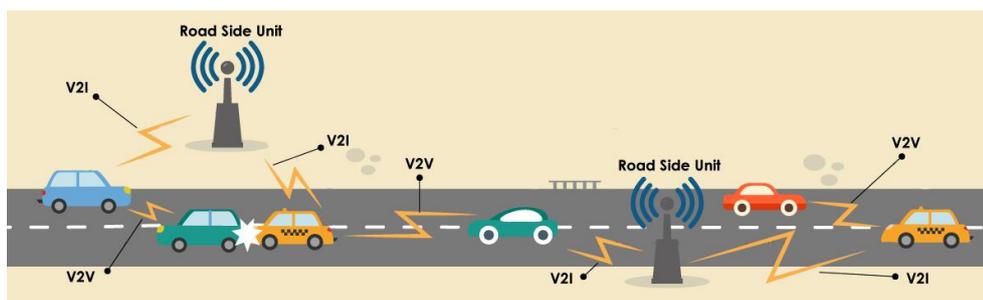


Figura 1. Tipos de comunicación en una VANET¹.

2.1.2. Características de VANETs

El comportamiento de los conductores, las limitaciones de movilidad y las altas velocidades crean características únicas en las VANETs, que permiten distinguirlas de otras redes ad hoc [28]. Estas características son [28][31]:

- **Alta movilidad y topología dinámica:** Los vehículos se mueven a altas velocidades y recorren grandes distancias, especialmente en las carreteras. Por lo tanto, se mantiene en un rango de comunicación con otros vehículos durante pocos segundos, y los enlaces se establecen y rompen de una manera rápida. Cuando la densidad vehicular es baja o los enlaces rotos no se han reestablecido a tiempo, la red se desconecta.
- **Posicionamiento geográfico disponible (GPS):** Los vehículos pueden estar equipados con sistemas de posicionamiento geográfico integrados con mapas electrónicos. Los GPS son muy populares en VANETs, ya que ayudan a proporcionar información de ubicación con fines de enrutamiento.
- **Movilidad conocida:** A diferencia de otras redes ad hoc, en las VANETs la movilidad de los nodos se encuentra limitada por la topología vial. Los vehículos se desplazan a lo largo de trayectorias predefinidas, por lo que se puede predecir cuánto tiempo duraría cubrir una ruta. Otros factores que influyen en esta característica son las señales de tránsito.

¹ Esta figura se basa en la imagen que se puede encontrar en: "Convergence of Secure Vehicular Ad-Hoc Network and Cloud in Internet of Things - Mahbubul Alam", Mahbubul Alam, 2016. [Online]. Available: <http://mahbubulalam.com/convergence-secure-vehicular-ad-hoc-network-cloud-internet-things/>. [Accessed: 20- Oct- 2016].

- **Restricciones de retardo:** En algunas aplicaciones para VANETs, como la difusión de mensajes de emergencia, no se requieren altas tasas de datos, pero es de suma importancia tener el menor retardo posible.
- **No existe limitación de potencia:** Debido a que los nodos son los vehículos, en lugar de pequeños dispositivos de mano, las limitaciones de potencia se pueden despreciar gracias a sus baterías.

2.1.3. Aplicaciones de VANETs

Las redes VANETs pueden ofrecer varias aplicaciones que se han desarrollado para permitir el intercambio de información entre usuarios, ya sea para fines de seguridad o de entretenimiento. A continuación, se detallarán las principales aplicaciones para VANETs.

a) Aplicaciones de transporte inteligente

Los ITS manejan una amplia gama de aplicaciones basadas en la seguridad vial y el análisis, manejo y gestión del tráfico. Con el uso de VANETs se pueden optimizar las aplicaciones desarrolladas. Por ejemplo, en un ITS normal cuando se da una situación de emergencia, los vehículos se comunican con una RSU y así consiguen información sobre lo que sucede, mientras que, con el uso de VANETs los vehículos se comunicarían entre sí y los retardos disminuirían notablemente. Esto se consigue gracias a los protocolos de enrutamiento manejados por las VANETs [33][34].

b) Aplicaciones de confort

Las aplicaciones de confort son aquellas que permiten a los usuarios de un vehículo de una VANET compartir información con otros usuarios, ya sea dentro de otros vehículos o con acceso a Internet. Estas aplicaciones tienen fines de entretenimiento. Por ejemplo, mediante una VANET un pasajero de un vehículo puede descargar contenido multimedia de Internet, mientras viaja [33][34].

c) Prevención de colisiones

La comunicación entre vehículos y con las RSUs puede salvar un sinnúmero de vidas y evitar varias lesiones. Cuando un vehículo detecte un accidente en la vía o cualquier percance, puede enviar mensajes de emergencia a vehículos que se aproximen y a RSUs cercanas, que ayuden a difundir dichos mensajes, para que de esta manera los conductores estén al tanto de la situación y puedan tomar mejores decisiones [33].

d) Manejo cooperativo

Este tipo de aplicaciones utilizan la cooperación entre conductores para evitar accidentes viales. Su modo de funcionamiento es simple: si es que algún conductor detecta algún peligro en la vía, como una curva peligrosa o un tramo de calzada resbalosa, avisa a los conductores próximos y a las RSUs cercanas para que difundan la información a todos los conductores que vayan a pasar por la zona peligrosa [33].

e) Mejora del tráfico

Con la ayuda de estas aplicaciones se busca evitar congestiones en las vías. Los vehículos recolectan información sobre la red y sus vecinos. Por ejemplo, la cantidad de vehículos que transitan en una vía, con sus respectivas velocidades. Esta información es enviada a todos los usuarios de la red para que, según sea el caso, puedan tomar rutas alternativas y evitar congestiones [33].

f) Servicios de pago

Estas aplicaciones son utilizadas para cobrar un peaje, evitando el hecho de que el vehículo se detenga o reduzca su velocidad. La aplicación almacena las credenciales del dinero electrónico del conductor para que, cuando pase por un peaje, se debite de su cuenta el valor del mismo [33].

g) Servicios basados en la ubicación

Con el uso de estas aplicaciones se pueden encontrar lugares de interés cercanos, como gasolineras o restaurantes. Accediendo al GPS del vehículo, la red puede alertar al conductor sobre los lugares que esté buscando, y con la ayuda del acceso a la web podrá saber sobre las características de cada uno. Una vez que haya elegido al que cumpla con sus necesidades, podrá realizar una reservación o comprar cierto producto [33].

2.2. Protocolos de enrutamiento para VANETs

Debido a las características que presentan las VANETs, como el cambio aleatorio de la cantidad de vehículos, los diversos patrones de movilidad según las horas del día, la topología limitada por reglas viales y la extensión de la zona de cobertura, los protocolos de enrutamiento diseñados para estas redes se clasifican en: protocolos basados en la posición, protocolos basados en la topología, protocolos basados en *broadcast*, protocolos basados en clústers y protocolos basados en la difusión geográfica [33].

2.2.1. Protocolos basados en la posición

En este tipo de protocolos, un nodo origen se comunica con el nodo destino, utilizando su posición geográfica. La posición geográfica de los nodos que van a establecer una comunicación se transmite mediante el uso de *beacons*², a través de los nodos vecinos [34]. Los componentes principales de estos protocolos son los *beacons*, los servicios de localización y el reenvío de información. Se necesita la asistencia de un GPS en cada vehículo [33].

Debido a que no existe ningún mecanismo de descubrimiento y mantenimiento de ruta, la decisión de encaminamiento se toma en base a la posición del nodo destino, que se encuentra en la cabecera del paquete, y a las posiciones de los vecinos del nodo origen. Este protocolo no almacena rutas ni tablas de enrutamiento, debido a que se asume que cada nodo es capaz de conocer la ubicación del destino, cuando sea necesario, gracias a la ayuda del GPS [33][34].

² Beacons: Son pequeños dispositivos basados en tecnología Bluetooth de bajo consumo, que emiten una señal que identifica de forma única a cada dispositivo. Ésta señal puede ser recibida e interpretada por otros dispositivos (normalmente, un Smartphone), conociendo además la distancia a la que se encuentran.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

Pros [33]

- Proporcionan un buen rendimiento en ambientes de carretera, en donde los vehículos se mueven a altas velocidad y las vías presentan un menor número de obstáculos.
- No se necesita la creación y mantenimiento de una ruta de origen a destino.
- En escenarios de alta movilidad, aumenta la estabilidad del sistema.
- Se consigue una menor sobrecarga de procesamiento.

Contras [33]

- Uso indispensable de un GPS en cada vehículo.
- El sistema se encuentra limitado por las características del GPS.

2.2.2. Protocolos basados en la topología

Estos protocolos utilizan la información disponible sobre la red para establecer un enlace entre el nodo origen y el nodo destino [33].

Pros [33]

- Crean una ruta salto a salto desde el origen hasta el destino.
- Manejan mensajes tipo *unicast*, *multicast* y *broadcast*.
- Se da un menor consumo de recursos.
- No existe la necesidad de usar beacons.

Contras [33]

- Existe una mayor sobrecarga de procesamiento debido a que se debe mantener una ruta para la comunicación.
- En algunas ocasiones no se puede descubrir la ruta hacia el destino por la constante movilidad de los nodos.
- Inundaciones innecesarias en la red.

Estos protocolos a su vez, se dividen en 3 subgrupos: proactivos, reactivos e híbridos.

a) Proactivos

Estos protocolos envían constantemente mensajes de descubrimiento que permitan definir nuevas rutas hacia diferentes nodos, suponiendo que dichas rutas en algún momento van a ser útiles [35]. Por este motivo, se da una sobrecarga de procesamiento en la red, ya que es necesario mantener actualizadas las tablas de enrutamiento [32].

Las principales ventajas que presentan es que no necesitan descubrir una nueva ruta cuando una aplicación lo requiera y la baja latencia; mientras que, sus desventajas son, una disminución del *throughput*, debido a la actualización periódica de las tablas de enrutamiento, y la lenta reacción ante posibles cambios de la topología [33][35].

Uno de los protocolos proactivos más conocidos es el *Optimized Link State Routing* (OLSR).

- *OLSR*

OLSR es un protocolo proactivo que envía constantemente mensajes para mantener las tablas de enrutamiento actualizadas. Presenta un funcionamiento eficiente en redes con alta densidad vehicular y topología extensa. Su principal característica es que busca optimizar el número de mensajes de control que maneja la red [32][35].

Debido a que el constante envío de mensajes ocasiona colisiones y sobrecarga, el tráfico de mensajes de control disminuye mediante el uso de nodos conocidos como *Multi-Point Relays* (MPR), cuya función principal es retransmitir los mensajes de *broadcast* en la red [32]. Un MPR selecciona el menor número de nodos vecinos, que puedan llegar a todos los nodos que se encuentren a una distancia de dos saltos para intercambiar información de control. Así, evita el envío masivo de mensajes [35]. En la Figura 2, se puede visualizar las conexiones que se forman en OLSR gracias a los MPRs.

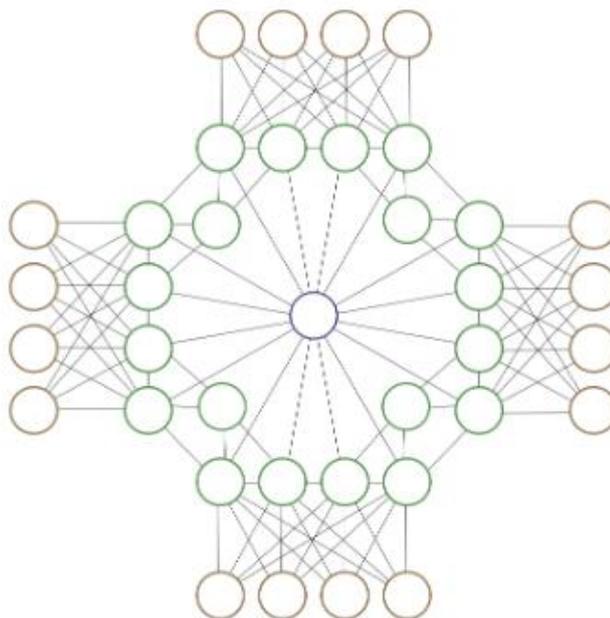


Figura 2. Funcionamiento del protocolo OLSR mediante MPRs [35].

El proceso para elegir cada MPR empieza con el envío de un mensaje tipo *HELLO*. Cada nodo envía un mensaje *HELLO* a todos sus nodos vecinos que se encuentren a un salto de distancia. Como cada nodo vecino conoce la totalidad de sus propios vecinos, dicho nodo conocerá información sobre todos los nodos que se encuentren a dos saltos de distancia y será asignado como MPR [35].

Las tablas de enrutamiento de cada nodo se actualizan de forma constante para detectar cualquier cambio que pueda ocurrir en la red. Para formar las tablas de enrutamiento se utilizan mensajes de tipo *Topology Control* (TC) y la información que contienen los MPR. Para que un nodo dé a conocer a la red el conjunto de enlaces que maneja, utiliza un mensaje TC, en el cual se incluyen al menos los enlaces con todos sus MPRs. Todos los nodos envían de forma constante mensajes TC [35].

b) Reactivos

Estos protocolos inundan la red con mensajes de descubrimiento cuando necesitan definir una ruta hacia un destino seleccionado [35]. Por esta razón, se presenta un retardo al inicio de la comunicación entre dos nodos [32].

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

Las principales ventajas que presentan son un mejor *throughput* debido a la eficiencia del uso de los mensajes de descubrimiento y una mejor respuesta ante cambios de topología o rotura de enlaces; mientras que, sus desventajas son la alta latencia y el riesgo de saturación de la red debido al descubrimiento de cada ruta [35].

Uno de los protocolos reactivos más conocidos es el *On-demand Distance Vector Routing* (AODV).

- *AODV*

AODV es un protocolo de enrutamiento reactivo, por lo que, sólo descubre una ruta cuando lo necesita. Por este motivo se origina una latencia alta en el establecimiento de la comunicación, pero permite disminuir el uso del ancho de banda y la sobrecarga de la red [35]. Para trazar las rutas hacia los diferentes nodos, se utiliza un vector distancia que se basa en el número de saltos entre el nodo origen y el nodo destino. Una vez que se actualiza una tabla de enrutamiento, las rutas agregadas pueden ser utilizadas por un periodo de tiempo, caso contrario, expiran y deberán ser encontradas de nuevo cuando sea necesario [32].

AODV presenta ciertas características adicionales, además de las que posee por ser un protocolo reactivo, las cuales se presentan a continuación [35]:

- Un nodo conoce únicamente los nodos con los que necesita comunicarse, es decir, ningún nodo conoce la topología completa de la red.
- La comunicación entre el nodo origen y el nodo destino se da por saltos. En pocas palabras, se maneja una comunicación salto a salto en la que, cada nodo que recibe un paquete, elige hacia que nodo dará el próximo salto para llegar a su destino.
- Se manejan horas lógicas³ que permiten diferenciar entre información nueva e información que se almacena en caché. Con esto se evita retransmitir información innecesaria.
- Toda la información de la red maneja un periodo de vida útil, por lo que, si no se utiliza, va a caducar.

³ Hora lógica: Es el instante de tiempo en el que un paquete llega a un nodo en AODV.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

Cuando un nodo origen tiene información para ser enviada, busca si es que en su tabla de enrutamiento existe una ruta hacia el nodo destino; si es que existe la utiliza para transmitir la información, caso contrario, debe iniciar el proceso de descubrimiento de ruta. Para esto, envía en *broadcast* un mensaje de tipo *Route Request* (RREQ). Cuando un nodo recibe un mensaje RREQ, comprueba si es que no recibió anteriormente un paquete con la misma información del nodo origen; si es que lo recibió, descarta el mensaje y no toma ninguna acción, pero si no lo recibió pueden darse tres casos [32][35]:

- 1) Que sea el nodo destino: En este caso el nodo responde con un mensaje *unicast* del tipo *Route Reply* (RREP) al nodo origen y así establecer la ruta.
- 2) Que el nodo destino se encuentre en su tabla de enrutamiento: En este caso el nodo responde con un mensaje RREP al nodo origen y se establece la ruta.
- 3) Que el nodo no conozca al nodo destino: En este caso, el nodo retransmitirá el paquete que recibió para poder encontrar al nodo destino.

Cada vez que un nodo recibe un mensaje RREP, actualiza su tabla de enrutamiento [35]. En la Figura 3, se indica el proceso de descubrimiento de ruta en AODV, en donde, el nodo A es el nodo origen y el nodo C es el nodo destino. El descubrimiento de ruta empieza cuando A busca establecer una conexión con C y no posee una ruta en su tabla de enrutamiento, entonces, inunda la red con mensajes RREQ. Los mensajes de A llegan a B, y debido a que B tampoco conoce una ruta hacia C, inunda nuevamente la red con mensajes RREQ. Finalmente, un mensaje RREQ llega a C con los datos de A, por lo que responde con un mensaje RREP hacia A. Este mensaje RREP pasa por B, que es un nodo intermedio, y se establece una ruta. Además, las tablas de enrutamiento de los nodos se actualizan.

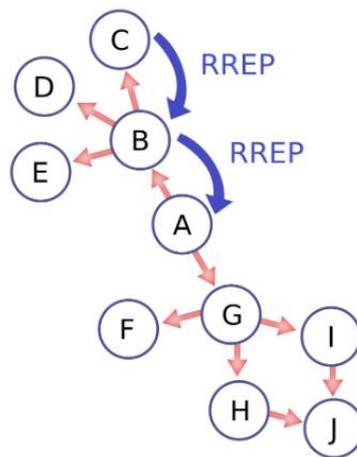


Figura 3. Descubrimiento de ruta entre el nodo A y C en AODV [35].

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

En el caso que, durante la comunicación, cierto nodo cambie de posición y rompa el enlace, la ruta quedará inutilizable. Entonces, el nodo que descubre este problema avisa a los nodos vecinos que han utilizado dicha ruta mediante un mensaje del tipo *Route Error* (RERR) [32]. Un mensaje RERR es similar a un mensaje RREP, pero con un número de salto con valor infinito. Esto hace que los mensajes deban reencaminarse por cualquier otra ruta [35].

c) Híbridos

Combinan las mejores características de los protocolos proactivos y reactivos [35]. Estos protocolos dividen la red en dos zonas, una local y una global [34]. Esto se realiza debido a que se descubren rutas entre las zonas mencionadas, para reducir la congestión de la red. La zona local utiliza protocolos proactivos, entre tanto, la zona global maneja protocolos reactivos [33].

La ventaja que presenta es una mejor eficiencia y escalabilidad, y su desventaja es la alta latencia para encontrar nuevas rutas [35].

2.2.3. Protocolos basados en *broadcast*

Este tipo de protocolos inundan la red con un paquete, a través de todos los nodos disponibles dentro de un dominio de *broadcast*. Este método es la manera más simple de difundir un mensaje. Su uso principal está enfocado en el desarrollo de aplicaciones de seguridad y publicidad [32][33].

Pros [32][33]

- Facilidad para compartir o difundir información por toda la red.
- Reducción en la complejidad del protocolo.

Contras [32][33][34]

- Alto consumo de ancho de banda y recursos.
- Alto riesgo de colisiones y sobrecargas en la red.
- Reducción de throughput por la entrega de paquetes repetidos a un mismo nodo.

2.2.4. Protocolos basados en clústers

En este caso, varios vehículos que comparten las mismas características, como velocidad y dirección, son agrupados en un mismo clúster⁴. Para manejar las comunicaciones entre varios nodos pertenecientes a un mismo clúster o entre diferentes clústers, se necesita seleccionar un nodo coordinador o cabecera de clúster. Cuando se necesita enviar un mensaje dentro del conjunto se ocupa una vía directa, mientras que, si el nodo destino se encuentra fuera del conjunto, el nodo coordinador crea una infraestructura virtual de red que provee escalabilidad [33].

Pros [32][33]

- Provee al sistema de una buena escalabilidad.
- Es adecuado para manejar redes con topologías extensas.

Contras [33]

- Presenta un retardo debido a las características dinámicas de la red.
- Se incrementa la sobrecarga de la red.

En la Figura 4, se puede observar el funcionamiento de esta clase de protocolos.

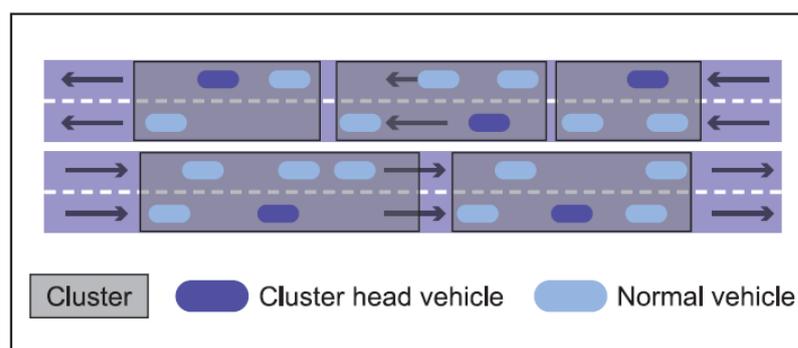


Figura 4. Funcionamiento de protocolos basados en clústers [34].

⁴ Clúster: Es un conjunto de elementos unidos entre sí normalmente por una red, que comparten características y se comportan como si fuesen uno solo.

2.2.5. Protocolos basados en la difusión geográfica

Estos protocolos utilizan mensajes *multicast* para realizar la comunicación entre vehículos. El principal factor que se toma en consideración es el retardo y el objetivo principal es dar soporte a la comunicación entre los vehículos que se encuentren dentro de una región predeterminada, conocida como zona de relevancia (ZOR). Si el nodo destino se encuentra en una ZOR diferente a la del nodo de origen, el mensaje se envía a través de la zona de reenvío (ZOF). Cada vehículo que entre a la ZOF tiene la responsabilidad de reenviar cualquier mensaje que reciba a todas las ZORs [33].

En la Figura 5, se detalla un resumen sobre la clasificación de los protocolos en enrutamiento para VANETs.



Figura 5. Clasificación de los protocolos de enrutamiento para VANETs.

2.3. Capa de Nodo Virtual (VNLayer)

La VNLayer o capa de virtualización se puede entender como un concepto abstracto de programación que contiene dos tipos de elementos. Por un lado, se encuentran los nodos virtuales predecibles (VNs) que corresponden a nodos estáticos virtuales, y, por otro lado, están los nodos físicos impredecibles (PNs), que corresponden a los nodos físicos de la red [36]. Entonces, la VNLayer define los procedimientos necesarios para que los PNs emulen a los VNs, que pueden ser direccionados como servidores estáticos. Para su implementación se divide el área geográfica de las MANETs en regiones cuadradas, cuyo tamaño se elige teniendo en cuenta que cada PN pueda comunicarse con los PNs de su región y de las regiones próximas. Un PN en cada región es elegido como líder. Cada líder se encarga de emular a un

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

VN y establecer una comunicación con los líderes de sus regiones vecinas. Además, un grupo de PNs no líderes trabaja como *backups* para mantener un respaldo de la información de las capas superiores, en el caso de que un líder falle. De esta manera, un VN puede conservar su estado, aunque un PN haya fallado o salido de la región, siempre y cuando exista por lo menos un PN cerca [9]. Mediante la implementación de un protocolo ARP virtual, se hace coincidir la dirección IP de cada líder con la de cada VN. En la Figura 6, se puede observar el modelo de capas TCP/IP con VNLayer.

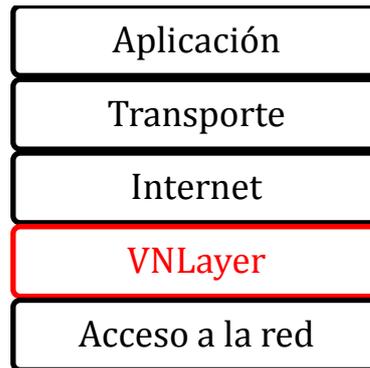


Figura 6. Modelo TCP/IP con VNLayer.

La VNLayer pueden dividirse en dos clases: la primera que establece un modelo de propagación ideal, en el cual se asume que todos los mensajes van a ser recibidos y los nodos tienen un comportamiento ideal; la segunda, establece un modelo más próximo a la realidad, en el cual existen pérdidas, colisiones, caídas de los nodos y retrasos por propagación [36].

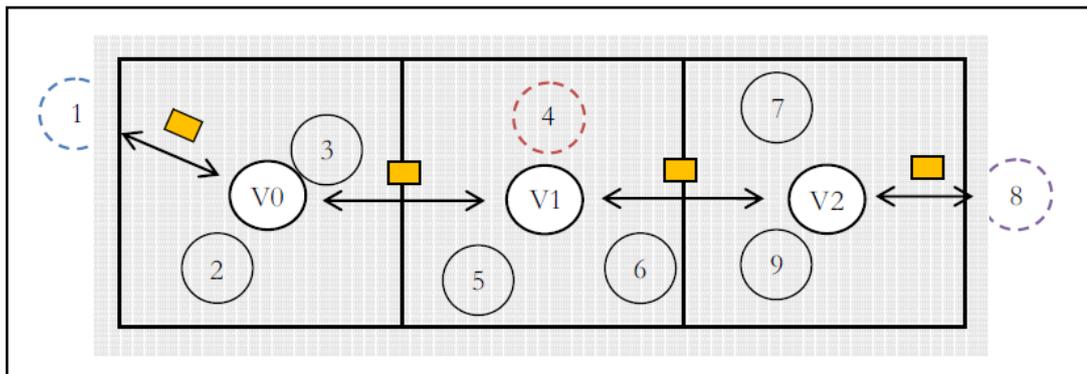


Figura 7. Ejemplo de VNLayer: Virtualización de los nodos; los nodos 2 y 3 emulan al nodo virtual V0, los nodos 4, 5 y 6 emulan al nodo virtual V1 y, los nodos 7 y 9 emulan al nodo virtual V2. La comunicación se da entre los nodos 1 y 8 a través de la ruta formada por los nodos V0, V1 y V2 [36].

La virtualización disminuye la sobrecarga de la red y su éxito se basa en la correcta división de la zona geográfica en regiones, la elección de un nodo líder para cada región y el uso de un

mismo protocolo de enrutamiento para toda la red [36]. En la Figura 7, se puede observar un ejemplo de un sistema que maneja VNLayer.

2.3.1. VaNetLayer

La VaNetLayer es una nueva capa de virtualización que modifica varias características de la VNLayer para poder hacerle frente a los retos de movilidad presentes en las VANETs. Las modificaciones que se realizan buscan mejorar seis aspectos ineficientes que presenta la VNLayer en su construcción. Dichos aspectos se detallan a continuación [9]:

- 1) El diseño de la cuadrícula de los VNs no toma en consideración la presencia de obstáculos y condiciones de propagación que influyen en las VANETs. Esto provoca que los líderes y *backups* no reciban los mismos paquetes, y que los líderes no se puedan comunicar entre sí.
- 2) El procedimiento de elección de un nuevo líder es demasiado lento, por lo que, existen periodos de ausencia de VNs en una región, aunque aún existan PNs.
- 3) Las direcciones duplicadas, debido a la pérdida de paquetes durante la elección de un nuevo líder, se trataron de una manera simple, por lo que cualquier nodo nuevo que entre en la región, sin información de las capas superiores, puede expulsar a un líder establecido.
- 4) El proceso de designación de *backups* era probabilístico, lo que significaba que podían existir regiones sin uno. Además, no existía un mecanismo que permita reemplazar los *backups* salientes por otros nodos no líderes dentro de la región; sólo los recién llegados podían tomar su lugar.
- 5) El procedimiento de elección de un líder podía designar como líder a un nodo que no esté funcionando como backup o a un backup que contenga información inconsistente con el estado del líder.
- 6) La VNLayer no hace ningún intento por preservar el estado de los VNs cuando sus regiones se han quedado sin el apoyo de por lo menos un PN, sin importar cuanto dure esta situación.

Estos aspectos no causan un mayor problema dentro de las MANETs, pero, cuando se habla de VANETs ocasionan problemas debido a las características de la red como alta movilidad y topología cambiante. En las próximas subsecciones se muestran las mejoras que presenta la VaNetLayer, para eliminar estos problemas.

- *Nuevo procedimiento para la creación de regiones*

La VNLayer divide al área de una MANET en regiones cuadradas, por lo que cada VN puede ser colocado en una cuadrícula. Esta configuración es un problema en una VANET, debido a que, por la presencia de edificaciones y la movilidad limitada por reglas viales, se compromete la suposición de que un PN puede comunicarse con todos los PNs de su región y con sus vecinos de otras regiones [9].

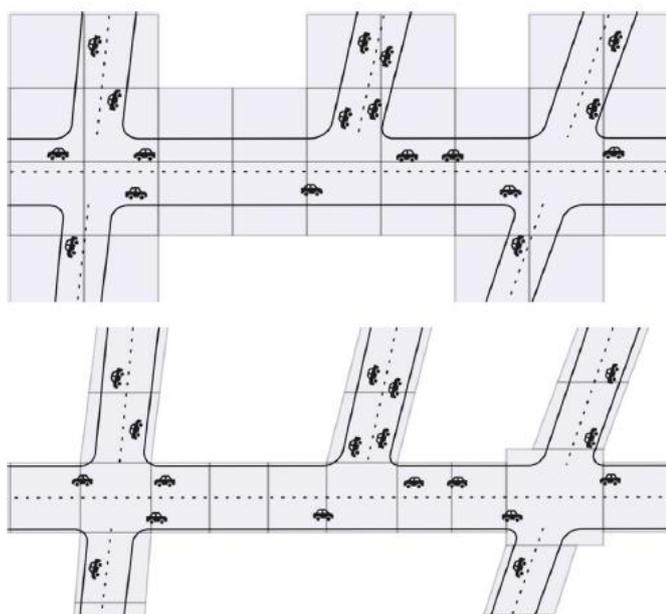


Figura 8. Mejoras que presenta la VaNetLayer. En la parte superior el área de la VANET fue dividida por la VNLayer. En la parte inferior el área de la VANET fue dividida por la VaNetLayer, teniendo en consideración los obstáculos de la vía [9].

La VaNetLayer se enfoca en cubrir las reglas de movilidad vial dejando de lado el uso de regiones de igual forma y tamaño. Por este motivo, se ha diseñado un procedimiento que permite a cada PN determinar la posición, tamaño y forma de las regiones, de forma local con un bajo costo computacional. La idea es que exista de forma predeterminada en cada intersección una región rectangular, para luego cubrir la totalidad de la vía, hasta llegar a otra intersección, con regiones cuadrangulares adicionales [9]. En la Figura 8, se puede observar que la VaNetLayer consigue reducir los problemas presentes debido a los obstáculos.

- *Cabecera de los paquetes de la capa virtual*

La VaNetLayer de un nodo debe poder comunicarse con la VaNetLayer de otro nodo, para esto genera sus propios paquetes [36]. En la Figura 9, se puede observar la estructura de los paquetes de la VaNetLayer.

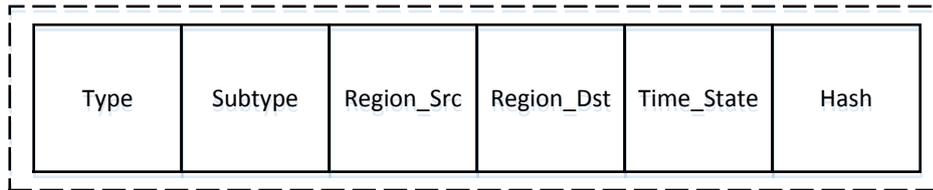


Figura 9. Encabezado de los paquetes de la VaNetLayer.

Existe dos tipos de paquetes, los que se encuentran relacionados con la elección de un nuevo líder e informan sobre el estado de un líder ya elegido, se conocen *LeaderElection*, y los que sirven para ayudar a elegir a un nuevo backup y ayudar a respaldar la información con un líder, se conocen como *Synchronization* [9]. Además, existen ocho subtipos de mensajes, según la tarea que el nodo deba cumplir.

Los mensajes que intercambian los nodos para elegir y saber el estado de un líder son [9]:

- *LeaderRequest*, que se utiliza para realizar una petición de ser líder.
- *HearBeat*, usado periódicamente por un líder para informar sobre su estado.
- *LeaderLeft*, usado por un líder para informar que está dejando la región.
- *LeaderReply*, enviado por un líder para denegar una petición de ser líder.

Los mensajes que intercambian los nodos para elegir y sincronizar un backup son [9]:

- *SyncRequest*, utilizado por un nodo para convertirse en backup y sincronizarse con el líder.
- *SyncData*, enviado por un líder con su información de estado.
- *SyncAck*, enviado por un backup para informar que se ha sincronizado.
- *BackupLeft*, usado por un backup para informar que está dejando la región.

Los campos de *Region_Src* y *Region_Dst*, se refieren a las regiones del nodo origen y del nodo destino, respectivamente. El campo *Time_State* se utiliza para informar a cada nodo sobre el

tiempo en el cual se realiza una acción, por ejemplo, una solicitud de líder. Finalmente, el campo *Hash* ayuda a comprobar si el paquete ha sido alterado durante la transmisión [9].

- *Elección del líder*

Existen cuatro estados por lo que puede pasar un nodo antes de ser líder, *INITIAL*, *REQUEST*, *LEADER* y *NON-LEADER* [9].

Todo nodo empieza con un estado *INITIAL*. Cuando entra a una región cambia su estado a *REQUEST*, y se posiciona inmediatamente como candidato a líder enviando un mensaje *LeaderRequest*; si es que existe un líder en la región, recibirá como respuesta un mensaje *LeaderReply*, y su estado cambiará a *NON-LEADER*, de lo contrario, se convertirá en líder y su estado cambiará a *LEADER* [9].

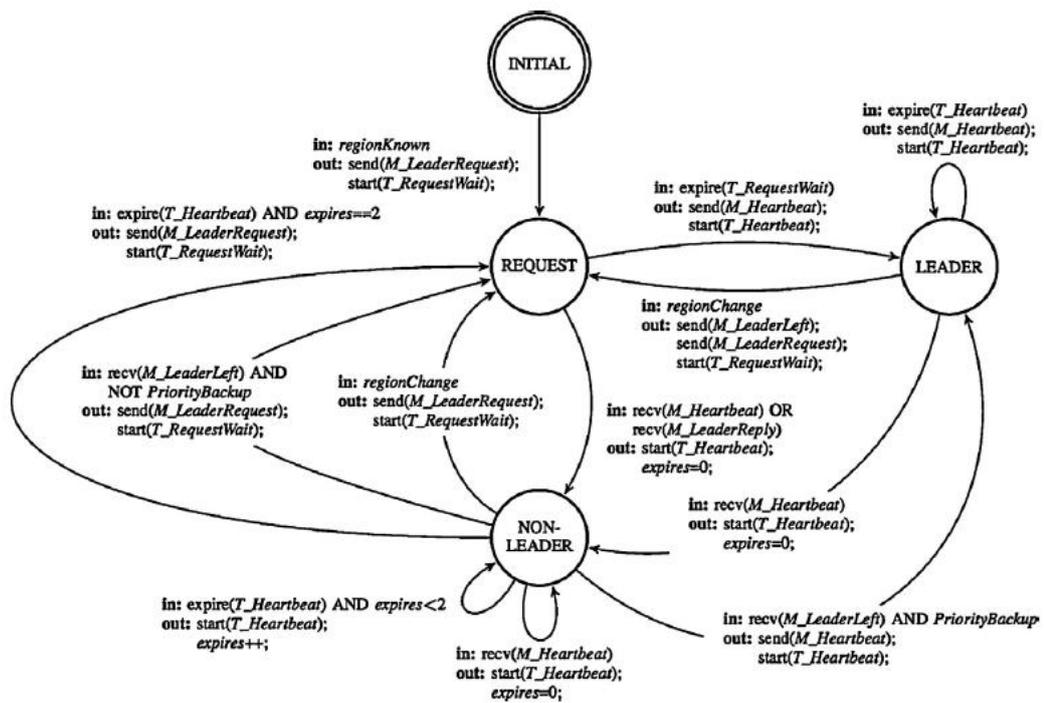


Figura 10. Algoritmo para la elección de un líder en la VaNetLayer [9].

En un ambiente que produzca pérdidas, existe el riesgo de tener un liderazgo duplicado. Para asegurarse que sólo exista un líder, se ha añadido un campo en los mensajes *HearBeat* para indicar el momento exacto en el que el nodo emisor se convirtió en líder. Cuando un líder recibe un mensaje *HearBeat*, compara el tiempo en el que el nodo emisor fue elegido como líder con su tiempo de elección; si el tiempo del otro líder es inferior a su tiempo cambia su estado a *NON-LEADER*, caso contrario, envía un mensaje *HearBeat* para asegurar su estado

[9]. En la Figura 10, se puede apreciar el algoritmo implementado para la elección de un líder en la VaNetLayer.

- *Designación de los Backups*

La VaNetLayer asegura que el número de *backups* en una región se mantenga, siempre que sea posible, por encima de un número mínimo, para garantizar la capacidad de recuperación de cada VN, y por debajo de un número máximo, para evitar la sobrecarga de la red. Para cumplir con este propósito, cada líder informa sobre el número de *backups* en cada mensaje *HearBeat* que envía por *broadcast*, consiguiendo así, que más nodos no líderes se ofrezcan para convertirse en *backups* y dar más soporte al VN [9].

Los PNs que vayan a convertirse en *backups*, envían un mensaje del tipo *SyncRequest* para sincronizarse sus estados con el estado del líder. El líder responde a los nuevos *backups* con un mensaje *SyncData* vía *unicast*, en el cual envía su información de estado para que puedan sincronizarse. Finalmente, los *backups* confirman que se han sincronizado con el líder, enviando un mensaje *SynAck* vía *broadcast*. Cuando un *backup* deja la región, envía un mensaje *BackupLeft* por *broadcast*, para permitir que otro nodo no líder tome su lugar [9].

2.3.2. *Intersection-Based Routing on Virtual Nodes Protocol (VNIBR)*

VNIBR es un protocolo que permite una eficiente combinación de enrutamiento geográfico y topológico, eliminando el uso de servicios de localización. Se basa en la capa de virtualización, que permite a los nodos físicos emular una infraestructura de nodos virtuales estáticos, por lo que, trabaja en la parte superior de la VaNetLayer [37]. Esto se puede observar en la Figura 11. Toma como base tres conceptos claves, los cuales se enumeran a continuación [37]:

- 1) El direccionamiento de los nodos se da en base a sus IP.
- 2) Las decisiones de enrutamiento se toman en las intersecciones de vía.
- 3) El reenvío de paquetes de una intersección a otra sigue un método geográfico.

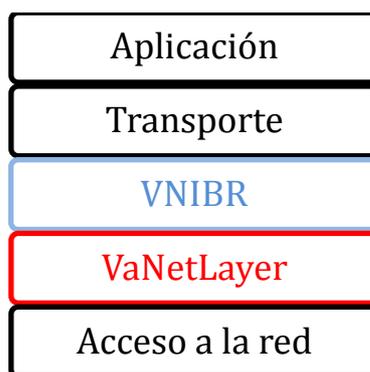


Figura 11. Modelo TCP/IP con VaNetLayer y VNIBR.

Como se puede observar en la Figura 12, la VaNetLayer divide el área geográfica de la red en regiones, siguiendo un diseño basado en las intersecciones. Se coloca un VN en cada cruce de vía y los segmentos restantes, entre una intersección y otra, se cubren mediante VNs equidistantes. El tamaño de cada segmento se determina según el rango de alcance que brinda la capa de acceso a la red, garantizando que cada PN pueda comunicarse con los PNs de su región y con los PNs de regiones vecinas [37].

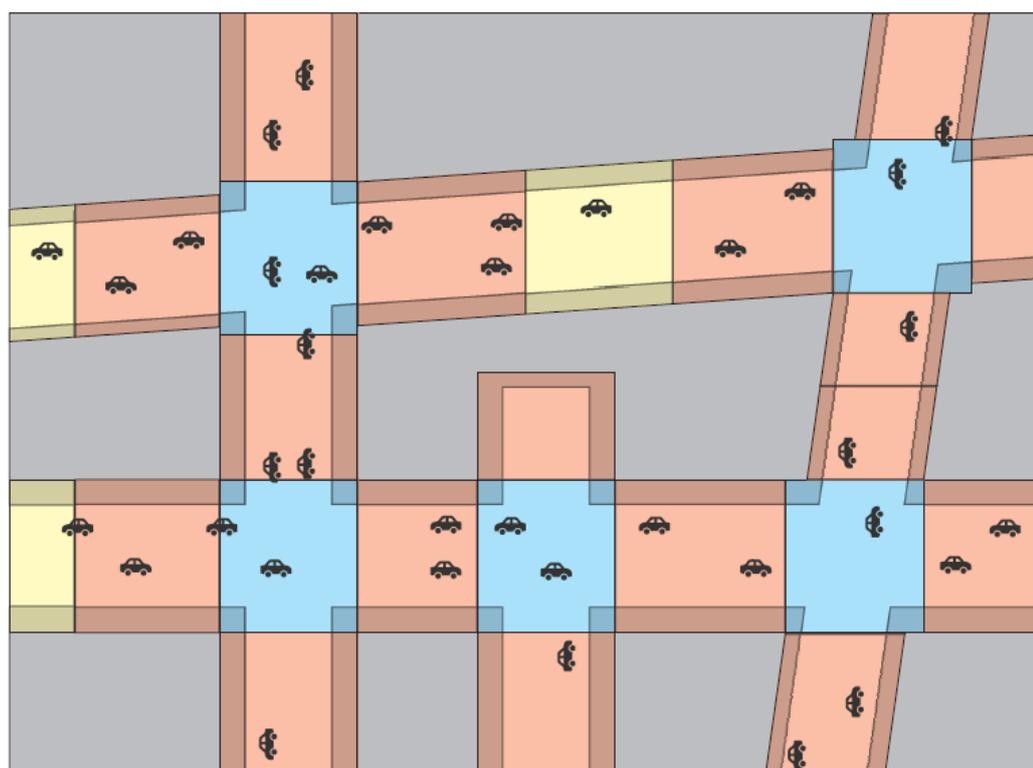


Figura 12. División del área geográfica de la VANET basándose en VNIBR [37].

La interfaz entre la VaNetLayer y la capa de red expone la importancia del uso de regiones, los roles que desenvuelve cada PN en un momento determinado y los procesos que permiten el intercambio de información entre los nodos. De esta forma, es posible adaptar los algoritmos

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

de enrutamiento existentes para definir a los VNs como entidades estables de enrutamiento. Por estos motivos, se desarrolló VNIBR como un protocolo de enrutamiento geográfico topológico, con rutas basadas en las intersecciones [37]. En VNIBR, se pueden diferenciar tres tipos de entidades de enrutamiento. A continuación, se detalla cada una.

- *Entidades de nivel 1 (L1VNs)*

Son las VNs que se colocan en las intersecciones; se pueden observar en la región azul de la Figura 11. En estos nodos se toman las decisiones de enrutamiento, que siguen un proceso adoptado de la lógica que maneja AODV. Las tablas de enrutamiento se mantienen de forma transparente por la VaNetLayer como información de estado persistente, con entradas que indican cual es el segmento de carretera próximo que los paquetes deben atravesar para llegar al destino correspondiente [37].

- *Entidades de nivel 2 (L2VNs)*

Son las VNs vecinas a las intersecciones; se pueden observar en la región roja de la Figura 11. Estas VNs comienzan con el envío de paquetes a lo largo de un segmento de la vía, siguiendo las instrucciones de un L1VN, sin importar que PN realiza la transmisión. Además, cada L2VN puede actuar como una entidad de respaldo para otras comunicaciones en la red, cuando sus L1VNs se encuentren inactivos [37].

- *Entidades de nivel 3 (L3VNs)*

Son las VNs que se encuentran en la mitad de cada segmento de vía; se pueden observar en la región amarilla de la Figura 11. Se encargan de retransmitir los paquetes de un lado a otro [37].

a) Establecimiento de rutas

Este protocolo, al seguir la lógica de AODV, tiene una naturaleza reactiva, por lo que las rutas son creadas sólo cuando un PN lo necesita. Para establecer una ruta, el PN origen inunda la

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

red con mensajes RREQ hacia los L1VNs que delimitan su segmento de vía. Cada L1VN pone su ID como primer elemento de una lista de L1VNs en la cabecera del RREQ y lo reenvía a las L1VNs que se encuentren a un segmento de vía de distancia. Además, se incluye un ID de *broadcast* que permite prevenir que cualquier L1VN transmita un mismo paquete más de una vez. La inundación que se realiza no implica una mayor sobrecarga para la red, debido a que se realiza únicamente entre los líderes que participan en la comunicación [37].

La ruta se establece cuando el RREQ llega a un L1VN que conoce un camino válido hacia el PN destino. Entonces, se envía un mensaje RREP que viaja a través de la ruta descubierta hasta llegar al PN origen, permitiendo que los L1VNs implicados actualicen sus tablas de enrutamiento [37].

Una vez que una ruta ha sido establecida entre dos PNs, los paquetes de datos son enviados entre los nodos líderes vía transmisiones *unicast*. En el caso de que alguna conexión falle, el nodo que detecte el problema utiliza un mensaje RERR vía *broadcast* para que el PN origen reestablezca el enlace, o envía un RREP para reiniciar la comunicación [37].

b) Mantenimiento de ruta

Para mantener las rutas creadas, VNIBR implementa un proceso de corrección que sigue los movimientos de cada PN. Cuando un vehículo se mueve hacia un nuevo segmento de vía, lo primero que hace es transmitir un paquete RREQ sin destino, entonces el L1VN por el que pasó, actualiza su tabla de enrutamiento. Además, si existe un L1VN en el otro extremo del segmento de vía, el vehículo envía un paquete RREQ especial con una lista de todos los PNs destino con los que mantiene comunicaciones en curso. Esto se hace para que este L1VN inunde la red con mensaje de descubrimiento y pueda establecer mejores rutas hacia dichos PNs destino, evitando el crecimiento innecesario del número de saltos del enlace [37].

2.4. Herramientas de simulación

Las herramientas que se ocupan para evaluar el rendimiento de los protocolos implementados son: NS-3, en el cual se realiza cada simulación, y SUMO, que permite obtener trazas de modelos de movilidad vehicular reales.

2.4.1. *Network Simulator 3 (NS-3)*

NS-3 es un simulador de eventos discretos. En este simulador se usa C++ como lenguaje base para escribir los elementos del *core* y los modelos de simulación. Al usarse C++, se presenta un simulador de red más escalable y fácil de utilizar [38].

Las ventajas que presenta NS-3 son el mantenimiento continuo y el rápido crecimiento de sus funciones, debido a la extensa comunidad de desarrolladores. NS-3 facilita la creación de redes inalámbricas ad hoc [38].

Las desventajas que posee es el hecho de no poseer una gran cantidad de módulos, debido a su corto periodo de funcionamiento, aproximadamente 5 años. Los códigos desarrollados en NS-3 pueden ser utilizados para la implementación en la vida real [38].

2.4.2. *Simulador de Movilidad Urbana (SUMO)*

SUMO es un simulador de tráfico que modela el comportamiento de los vehículos dentro de un escenario de movilidad urbana. El patrón de comportamiento de cada vehículo se basa en las rutas que toma, las intersecciones presentes en las vías y reglamentos que rigen el sistema vial. Se encuentra bajo una licencia gratuita y su función principal es generar trazas de movilidad que son utilizadas en NS-3 [39].

En el siguiente capítulo, se describe el diseño de un protocolo de encaminamiento para la difusión de mensajes de alarma basado en la capa virtual y VNIBR. Se detalla su funcionamiento y sus principales características, las cuales buscan obtener un mejor rendimiento, en relación a protocolos ya existentes.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DE UN PROTOCOLO DE ENCAMINAMIENTO PARA LA DIFUSIÓN DE MENSAJES DE ALARMA: VNIBR-E

En este capítulo se detallará el protocolo diseñado, que será denominado como VNIBR-E (*VaNetLayer Intersection-Based Routing Emergency Protocol*). Este nuevo protocolo se basa en VNIBR, por lo que su funcionamiento está gobernado por las características propias de la VaNetLayer. Se explicarán a fondo las modificaciones o implementaciones realizadas para obtener el mínimo retardo posible en la difusión de los mensajes de emergencia, debido a que se dará soporte a una aplicación de seguridad vial.

El aspecto principal en el que se basa el diseño de VNIBR-E, es ofrecer un tiempo mínimo de retardo en la transmisión de mensajes de alarma en una situación de emergencia. En la difusión de este tipo de mensajes, se busca llegar al mayor número de vehículos, entonces, trabajar en base a las intersecciones de cada vía ayuda a cubrir un alcance adecuado. Por este motivo, el diseño se basa en VNIBR, el cual debe ser modificado para obtener aspectos propios de una aplicación de seguridad vial.

Este capítulo está conformado por la sección 3.1, en donde se expondrá todo lo relacionado al diseño del protocolo

3.1. Diseño del protocolo

VNIBR-E es un protocolo de encaminamiento para la difusión de mensajes de alarma para VANETs. Funciona sobre la capa de virtualización VaNetLayer, por lo que, cada nodo vehicular será conocido como un PN. En la Figura 13, se puede observar su modelo TCP/IP. Además, al estar basado en VNIBR, comparte algunas de sus características, las cuales se describen a continuación:

- El área geográfica sobre la que trabaja está dividida en función de las intersecciones de vía.
- Se manejan las entidades de enrutamiento L1VN, L2VN y L3VN.

CAPÍTULO 3. DISEÑO UN PROTOCOLO DE ENCAMINAMIENTO PARA LA DIFUSIÓN DE MENSAJES DE ALARMA: VNIBR-E

- En cada región existen PN líderes, *backups* y no líderes.
- Los PN líderes emulan VNs.

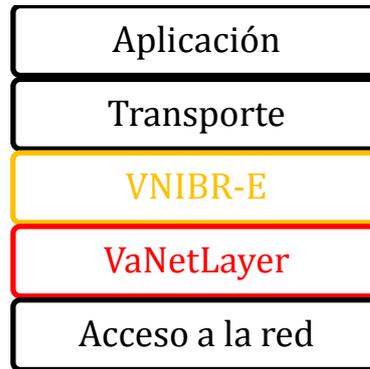


Figura 13. Modelo TCP/IP de VNIBR-E.

El objetivo principal de VNIBR-E es proveer el encaminamiento necesario para difundir mensajes de alarma en el momento que cualquier PN detecte algún incidente en la vía, garantizando el mínimo retardo posible. Por este motivo, se han modificado algunas características de VNIBR, incluida la cabecera de los paquetes que se envían.

3.1.1. Cabecera de VNIBR-E

La cabecera de los mensajes que maneja este protocolo mantiene la base de la cabecera de la VaNetLayer, que es la misma de VNIBR, pero agrega dos campos que ayudan a difundir la información de alarma de una forma eficiente. En la Figura 14, se detalla la cabecera de VNIBR-E.

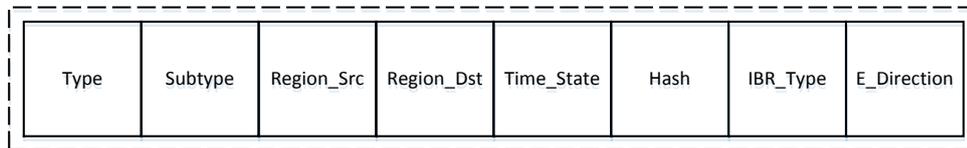


Figura 14. Cabecera de un paquete VNIBR-E.

Debido a que existe la posibilidad de explotar el protocolo VNIBR, se ha creado el campo *IBR_Type*, en el cual se especifica el funcionamiento que tendrá el protocolo; en este caso, se rellena con la opción *IBREmergency*, quedando a disposición de futuros trabajos implementar nuevas formas de funcionamiento. El campo *E_Direction* se adicionó para indicar a los PNs

CAPÍTULO 3. DISEÑO UN PROTOCOLO DE ENCAMINAMIENTO PARA LA DIFUSIÓN DE MENSAJES DE ALARMA: VNIBR-E

la dirección que debe seguir cada mensaje; se puede rellenar con las opciones *EmergencyUp*, *EmergencyDown*, *EmergencyRight* y *EmergencyLeft*, que representan las direcciones arriba, abajo, derecha e izquierda, respectivamente. Esto, permite controlar el flujo de información según las vías e intersecciones por las que deba pasar cada mensaje hasta llegar a su destino.

3.1.2. Funcionamiento de VNIBR-E

En una situación de emergencia uno de los factores más importantes es el tiempo de respuesta de los conductores, ya que si la situación se conoce lo más rápido posible se podrá actuar de una manera más eficiente, evitando crear más accidentes y saturar el tráfico. Por este motivo, VNIBR-E tiene un comportamiento diferente a los protocolos comunes para VANETs. Maneja un encolamiento que le da prioridad a los mensajes de emergencia y no se especializa en crear una ruta hacia un destino, ni mucho menos en mantenerla. Por estos motivos, en VNIBR-E los mensajes se transmiten entre líderes vecinos que se escuchan unos con otros. Cuando ocurre un accidente en una región, cualquier PN, ya sea líder, *backup* o no líder, puede detectarlo, pero únicamente el líder (o en su defecto el *backup*) puede retransmitirlo. Esta transmisión se da únicamente entre los líderes de cada región a través de la capa virtual.

Los mensajes de emergencia se envían vía *unicast* para evitar crear rutas, sin embargo, todos los PNs que se encuentre al alcance del líder origen lo podrán escuchar. Por esta razón, se toma en consideración cuáles son los líderes vecinos del líder origen y las regiones a las que pertenecen. Entonces, cuando un líder recibe un mensaje de emergencia analiza si el emisor se encuentra en una región vecina y es un líder; si se cumple con esta condición se retransmite el mensaje hacia su líder vecino según la dirección que indique el paquete, caso contrario lo desecha. Cuando un mensaje llega a un líder perteneciente a una intersección y cumple con las condiciones dadas, se retransmite en todas las direcciones, a excepción de la dirección de origen. La transmisión finaliza cuando se alcanza un número predeterminado de intersecciones en cada dirección. A continuación, se detallan las acciones que realiza este protocolo en una situación de emergencia.

- 1) Cuando se da un accidente en una región dada, un PN la detecta e inicia la difusión de mensajes de emergencia.
- 2) Si el PN es un *backup* o un no líder, envía un mensaje de emergencia al líder de su región.
- 3) El líder de dicha región retransmite el mensaje de emergencia a sus líderes vecinos vía *unicast*.

CAPÍTULO 3. DISEÑO UN PROTOCOLO DE ENCAMINAMIENTO PARA LA DIFUSIÓN DE MENSAJES DE ALARMA: VNIBR-E

- 4) Se da una retransmisión del mensaje de emergencia entre los líderes, tomando en consideración la dirección que debe seguir la información.
- 5) La transmisión finaliza cuando el mensaje haya llegado a un número de intersecciones dado en cada dirección.

Las características de la capa virtual permiten que todos los PNs pertenecientes a una región escuchen los mensajes que recibe su líder. En la Figura 15, se puede observar el diagrama de flujo que sigue VNIBR-E.

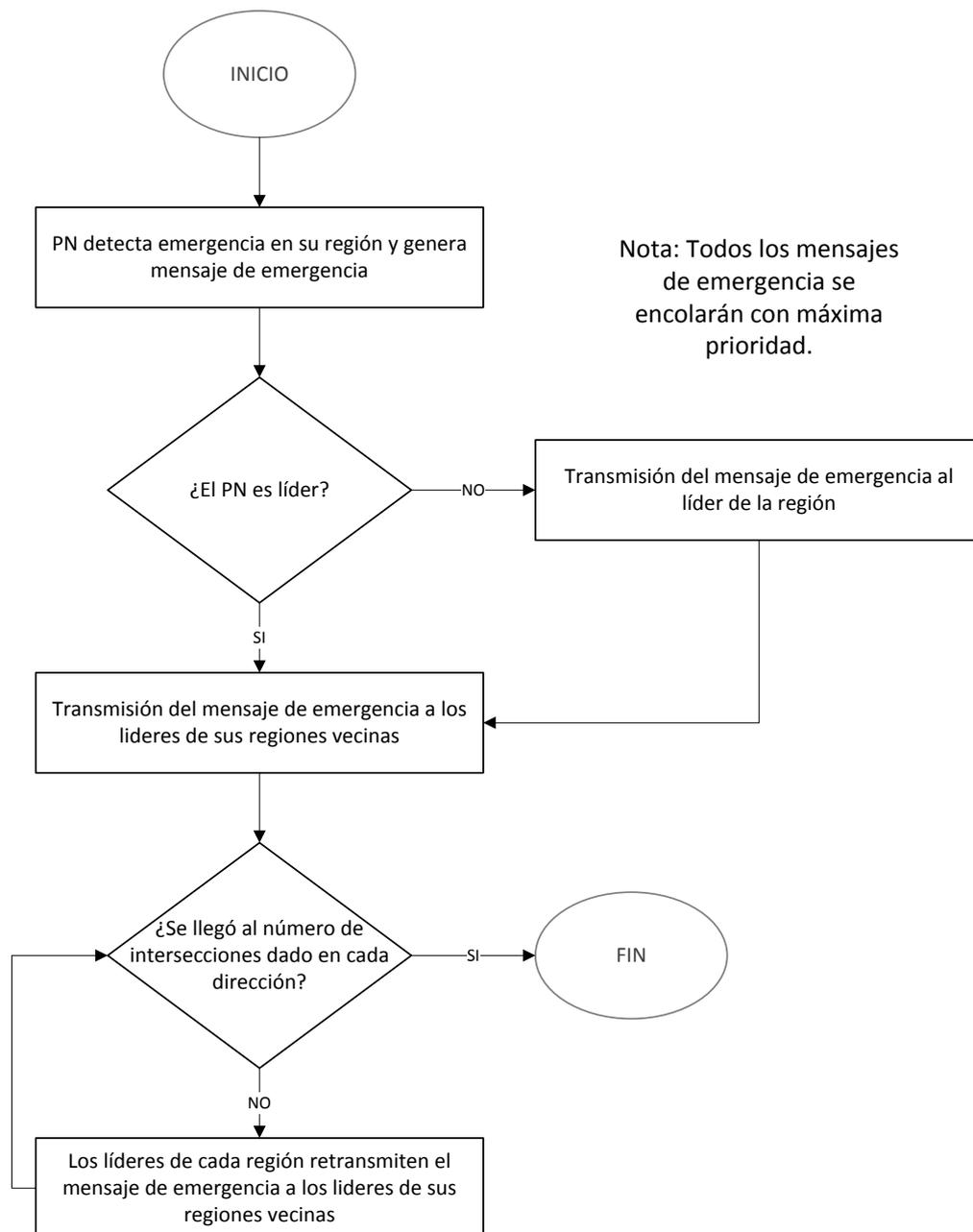


Figura 15. Diagrama de flujo del funcionamiento de VNIBR-E.

CAPÍTULO 3. DISEÑO UN PROTOCOLO DE ENCAMINAMIENTO PARA LA DIFUSIÓN DE MENSAJES DE ALARMA: VNIBR-E

Finalmente, para facilitar la comprensión del funcionamiento de VNIBR-E se establece una situación de emergencia en la Figura 16. Se supone que se da un accidente de tránsito en la región R7 y se desea difundir información sobre la situación a un máximo de dos regiones en cada dirección. Entonces, un nodo no líder detecta la emergencia e inmediatamente inicia la transmisión de mensajes de alarma. Como es un nodo no líder envía un mensaje de alarma a su líder, el cual retransmite dicho mensaje a los líderes de sus regiones vecinas. Debido a que el incidente se da en un segmento de vía horizontal, el líder de R7 envía dos mensajes, el primero hacia la izquierda (*EmergencyLeft*) para R6 y el segundo hacia la derecha (*EmergencyRight*) para R8. Este proceso se repite hasta que se llegue al líder de una intersección. Al momento que se llega al líder de una intersección, este difunde el mensaje hacia sus regiones vecinas, a excepción de la región de origen del mensaje. Tomando como ejemplo la intersección R5, cuando un mensaje llegue, su líder lo retransmite tres veces, hacia la izquierda (*EmergencyLeft*) para R4, hacia arriba (*EmergencyUp*) para R17 y hacia abajo (*EmergencyDown*) para R18. La transmisión finaliza cuando se alcanza el número de intersecciones dado, que en este caso sería cuando se llegue a R1, R13, R14, R22, R21 y R29.

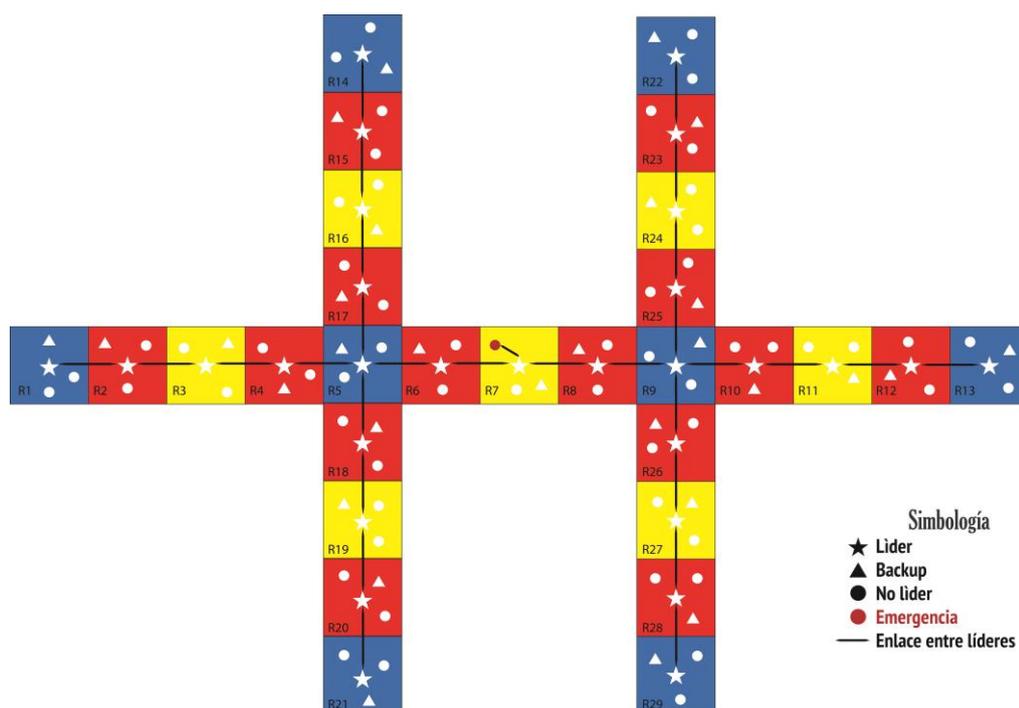


Figura 16. Situación de emergencia: funcionamiento de VNIBR-E.

En el siguiente capítulo se realizarán simulaciones de una situación de emergencia en la vía para evaluar el rendimiento de VNIBR-E en comparación a OLSR y AODV. Se establecerán parámetros de diferentes escenarios de simulación, los cuales permitirán analizar el retardo y el *throughput* que presenta cada protocolo.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Antes de implementar cualquier sistema o tecnología físicamente, es necesario realizar pruebas y simulaciones que permitan predecir el comportamiento que tendrá. En este caso, el simulador que se utilizó para obtener resultados del funcionamiento del protocolo diseñado fue NS-3, que es un simulador discreto de eventos basado en C++. Además, mediante SUMO, que es un simulador de movilidad urbana, se implementaron patrones de movilidad al escenario de simulación elegido.

Para comprobar el rendimiento de VNIBR-E se realizaron simulaciones que permitieron compararlo con dos protocolos desarrollados para VANETs: OLSR que es un protocolo proactivo y AODV que es un protocolo reactivo. Todos los protocolos trabajaron sobre el mismo escenario vehicular y bajo las mismas condiciones. Las métricas que se evaluaron en los tres protocolos son el retardo y el *throughput*, debido a que el aspecto más importante de la funcionalidad de VNIBR-E es ofrecer un mínimo retardo en una situación de emergencia.

Este capítulo está organizado de la siguiente manera: en la sección 4.1, se explican brevemente las métricas que se evalúan en cada protocolo. En la sección 4.2, se detalla el escenario de simulación que se implementó, es decir, la configuración de sus parámetros y las diferentes situaciones que se tuvieron en cuenta. Finalmente, en la sección 4.3, se analizan los resultados obtenidos para comprobar la eficiencia de VNIBR-E.

4.1. Métricas de simulación

Las métricas de simulación son parámetros que se miden en una red para evaluar su rendimiento [40]. Estos parámetros pueden ser: el retardo, el *throughput*, el *jitter*, el tiempo de respuesta, la tasa de llegada, el ancho de banda, la tasa de paquetes perdidos y la confiabilidad. Debido a que, en este proyecto se tomó en cuenta el retardo y el *throughput* de cada protocolo implementado, a continuación, se los explica brevemente.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- **Retardo**

Se puede definir como el tiempo que le toma a un paquete llegar a su destino. El tiempo se mide desde que el paquete es enviado por su origen [40].

- **Throughput**

Es una medida que indica el número de paquetes que pueden ser enviados en la red por una unidad de tiempo [40].

4.2. Escenario de simulación

El escenario que se implemente para realizar cualquier simulación es uno de los aspectos más importantes para obtener resultados correctos. Por tal razón, se debe elegir uno que se apegue lo más posible a la realidad. Debido a que los protocolos que se van a comparar se desarrollaron para ser utilizados en VANETs, es indispensable probarlos en una situación de emergencia en un medio urbano vehicular. Es por esto que el área de simulación escogida comparte características con un centro urbano (posee edificaciones y los vehículos siguen reglas viales de movilidad), teniendo un tamaño de 1035 x 1035 m. Los vehículos mantienen una velocidad promedio de 50 Km/h y se mueven en segmentos de vía con una separación de 115 m. entre intersecciones. En la Figura 17, se puede observar el escenario implementado en donde se configuraron nodos fijos (VNs) y nodos móviles (PNs). Se garantiza la existencia de un PN en cada región para dar soporte a cada VN, y a más de esto, existen PNs independientes de los cuales depende la densidad vehicular. Una situación de emergencia se puede dar en cualquier región y un PN la detectará para dar inicio a la difusión de mensajes de emergencia. Asimismo, el número de intersecciones que se desea alcanzar, varía tomando valores entre 1 y 4.

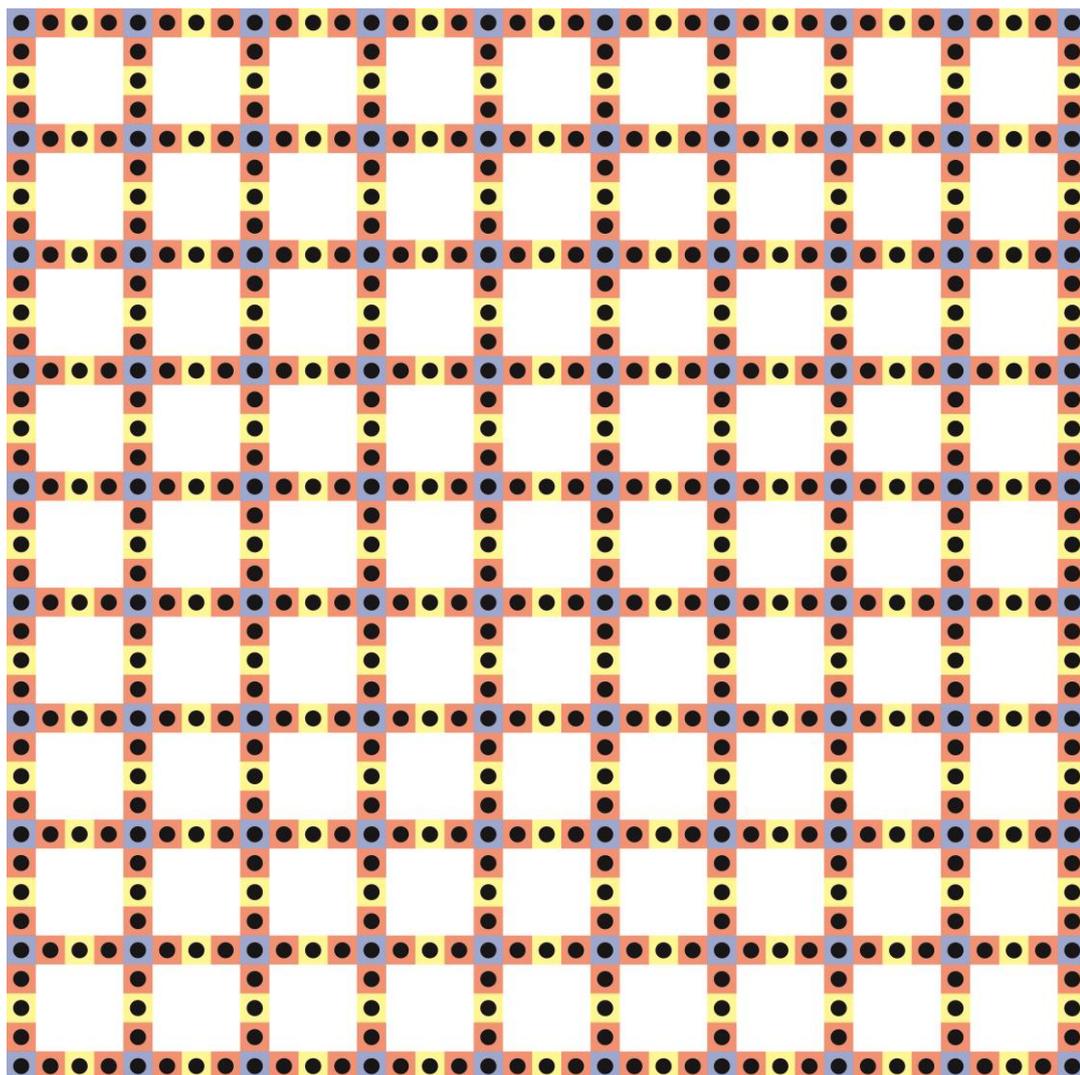


Figura 17. Escenario vehicular implementado.

Se realizaron varias simulaciones por protocolo, variando la densidad vehicular, la cual se configuró en valores de 10, 50 y 100 nodos móviles, y el número de intersecciones alcanzadas. Además, para simular una situación más real, se implementó tráfico de red en forma de tasa constante de bits (CBR) entre el nodo origen, que es el que detectó la emergencia, y los nodos destino, que son los líderes de cada intersección alcanzada. En la Tabla 1., se detallan todos los parámetros de simulación que se configuraron. Los resultados obtenidos se analizan en la siguiente sección.

| Parámetro | Valor |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Simulador | NS-3 |
| Protocolo de enrutamiento | AODV, OLSR, VNIBR-E |
| Escenario de simulación | Centro Urbano |
| Área de simulación | 1035 m x 1035 m |
| Modelo de propagación | Hybrid Buildings Propagation Loss Model |
| Distancia entre intersecciones | 115 m |
| Multiplexación | OFDM |
| Data rate | 6 Mbps |
| Tiempo de simulación | 100 s |
| Número de nodos virtuales y nodos físicos de soporte | 45 |
| Número de nodos físicos independientes (Densidad Vehicular) | 10, 50, 100 |
| Número de intersecciones de difusión de mensajes de alarma | 1, 2, 3, 4 |
| MAC | 802.11p |
| Protocolo de transporte | UDP |
| Tamaño de los paquetes de alarma | 1024 bytes |
| Tasa de transmisión de los paquetes de alarma | 10 Hz |
| Tamaño de los paquetes de CBR | 512 bytes |
| Tasa de transmisión de los paquetes CBR | 1000 Hz |

Tabla 1. Parámetros del escenario de simulación.

4.3. Análisis de resultados

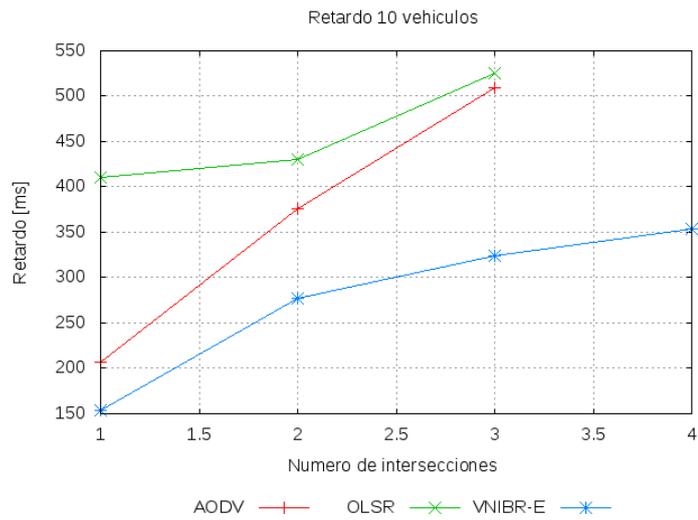
Los resultados obtenidos en la simulación de cada protocolo, ayudan a determinar su rendimiento. A continuación, se analizan los valores de retardo y *throughput* conseguidos en cada simulación.

4.3.1. Retardo

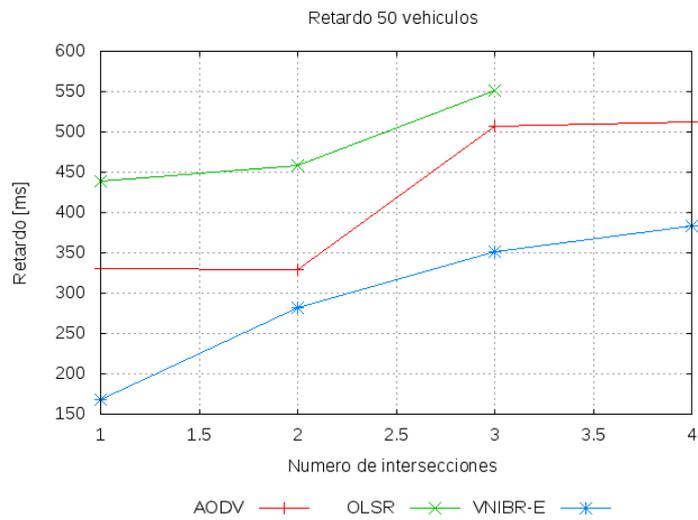
Los resultados obtenidos en cada protocolo para esta métrica se muestran en la Figura 18. Al analizar estos resultados, se puede observar que VNIBR-E presenta un mejor rendimiento al variar la densidad vehicular y el número de intersecciones alcanzado. Esto es debido a que no existe la necesidad de crear o mantener rutas y se implementó una máxima prioridad de encolamiento para mensajes de emergencia. También, se da una transmisión más rápida porque cuando un líder recibe un mensaje, inmediatamente lo transmite a sus líderes vecinos; no se pierde tiempo. En AODV y OLSR el rendimiento disminuye por la creación de rutas, ya que el proceso de descubrimiento consume cierto tiempo. Asimismo, la sobrecarga en la red causa un retardo en la entrega de paquetes. Esto se puede evidenciar más en OLSR, ya que genera más sobrecarga por la constante actualización de sus tablas de enrutamiento.

El retardo aumenta en cada protocolo en función del número de intersecciones alcanzadas y la densidad vehicular. En la Figura 18 (a) se evidencia que con VNIBR-E se puede llegar a cuatro intersecciones, contrariamente a lo que sucede en AODV y OLSR que sólo llegan a tres. Esto se debe principalmente a que en VNIBR-E, no se crean rutas, por lo que no hay un riesgo de ruptura de enlace. Este problema es causado por la movilidad de los vehículos que salen del rango de transmisión. En la Figura 18 (b) con VNIBR-E y AODV se alcanzan cuatro intersecciones, siendo VNIBR-E el que presenta un mejor rendimiento. Con OLSR, se asume que se puede llegar a la cuarta intersección, debido al aumento de densidad vehicular, pero al existir mayor sobrecarga en la red, los paquetes se pierden. Finalmente, en la Figura 18 (c) todos los protocolos alcanzan las cuatro intersecciones, siendo VNIBR-E el de mejor rendimiento. Bajo estas condiciones AODV muestra un retardo más grande, en el cual ya se puede evidenciar los problemas que causa la creación de rutas en el momento que un nodo inicia la transmisión.

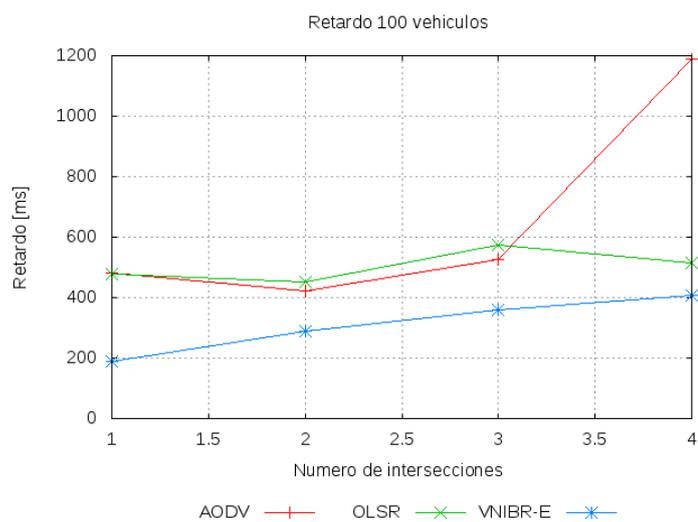
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS



(a)



(b)



(c)

Figura 18. Retardo.

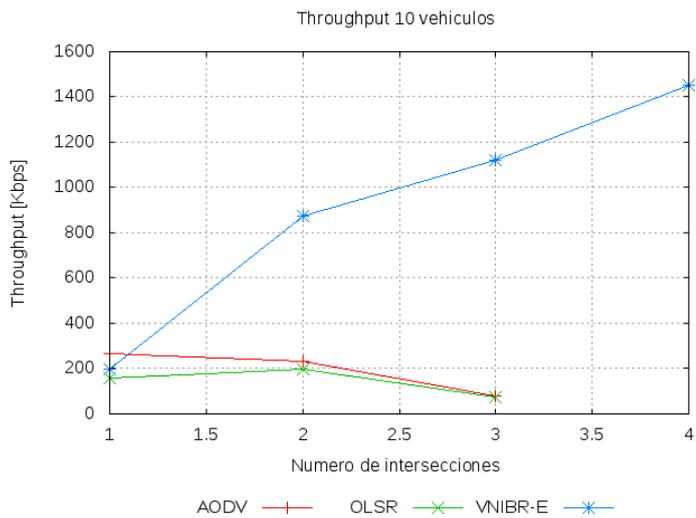
4.3.2. *Throughput*

Los resultados obtenidos en cada protocolo para esta métrica se exponen en la Figura 19. Al analizar estos resultados se puede evidenciar que VNIBR-E presenta un mejor rendimiento en la mayoría de resultados porque, al existir una transmisión sólo entre líderes, la sobrecarga en la red es insignificante y la pérdida de paquetes disminuye. La única excepción se da cuando se alcanza una sola intersección, ya que AODV presenta ligeramente un mejor rendimiento. Esto se debe a que no existe una sobrecarga significativa que pueda saturar la red mientras se da un descubrimiento de ruta. VNIBR-E presenta un menor rendimiento que AODV en este caso porque se hacen notorias las caídas de los líderes. Cuando un líder se cae, se da una disminución de *throughput*, como consecuencia del tiempo que le toma al backup retransmitir los mensajes. En el resto de casos (cuando se alcanza más intersecciones), AODV y OLSR tienen un rendimiento mucho menor, causado principalmente por las colisiones y pérdidas de paquetes que se dan por la creación de rutas. En OLSR se puede percibir esta situación de forma más clara, debido a la constante inundación de la red con mensajes de descubrimiento de ruta.

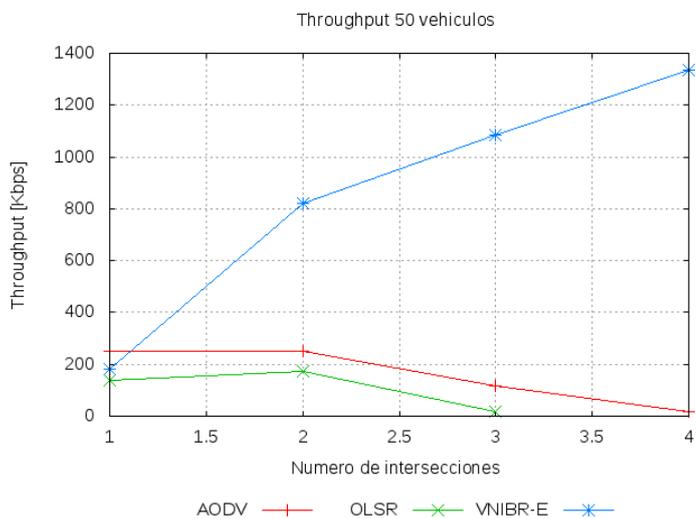
El *throughput* de los protocolos aumenta en función del número de intersecciones alcanzadas y disminuye en función de la densidad vehicular. En la Figura 19 (a) únicamente VNIBR-E alcanza las cuatro intersecciones porque, al no necesitar crear rutas, no se da una ruptura de enlaces por la movilidad de los vehículos, como sucede en AODV y OLSR que únicamente alcanzan tres. En la Figura 19 (b) VNIBR-E y AODV alcanzan las cuatro intersecciones, pero el rendimiento de VNIBR-E es significativamente mayor, ya que tiene menos pérdida de paquetes por su mecanismo de respaldo en backups y no ocasiona sobrecargas. OLSR no alcanza las cuatro intersecciones, pero esto es debido a la sobrecarga que introduce en la red por su constante proceso de descubrimiento y actualización de ruta. Finalmente, en la Figura 19 (c) todos los protocolos alcanzan las cuatro intersecciones, pero el rendimiento de AODV y OLSR es demasiado pobre. Esto se da porque, al existir un mayor número de nodos, la sobrecarga en la red aumenta en gran medida por el descubrimiento de ruta, ocasionando un mayor número de colisiones y pérdidas de paquetes.

Cabe destacar que en todas las simulaciones se utilizó una CBR que emule tráfico en la red, para obtener resultados más apegados a la realidad. En el siguiente capítulo se exponen las conclusiones a las que se llegó, después de realizar el análisis de resultados.

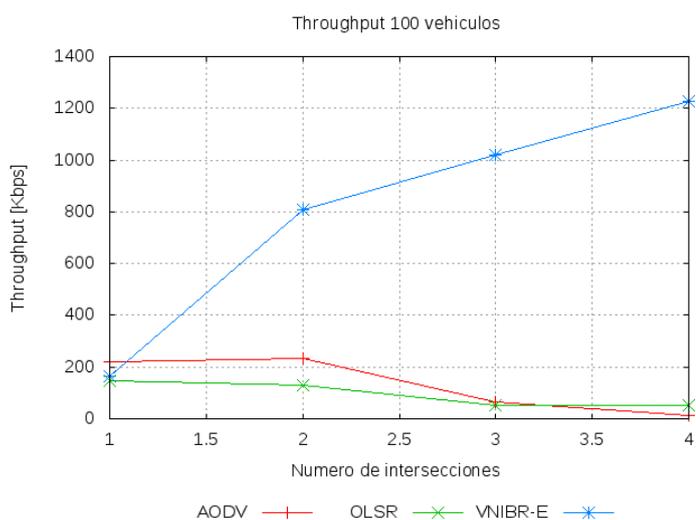
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS



(a)



(b)



(c)

Figura 19. Throughput.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este proyecto de fin de carrera se diseñó un protocolo de encaminamiento para la difusión de mensajes de alarma en VANETs (VNIBR-E). Se tomaron en cuenta todos los requerimientos que necesita una aplicación de emergencia, por lo que su objetivo principal es ofrecer el mínimo retardo posible, ante una situación de este tipo. Existen varios protocolos desarrollados para VANETs, pero su principal función es la creación de rutas entre dos nodos para establecer una comunicación. Si se habla de una red con una densidad vehicular baja, esto no sería un mayor problema, debido a que el tiempo que se ocupa en establecer una ruta sería mínimo y no afectaría el rendimiento de la red; pero, conforme la densidad vehicular aumente, el tiempo que se tome en establecer una ruta afectará el rendimiento de la red, ya que se notaría un retardo cada vez mayor. Es por esto que VNIBR-E no se ocupa en la creación de rutas. Divide el área geográfica de la red en regiones a las que asigna un líder y propone una comunicación inmediata entre dichos líderes una vez que recibe un mensaje de emergencia.

Para comprobar el funcionamiento de VNIBR-E se realizaron una serie de simulaciones que permitieron analizar el retardo y el *throughput* que presenta, en comparación con OLSR y AODV. Con los resultados obtenidos, se puede concluir sobre su rendimiento. Además, al comprobar su funcionamiento, se puede proponer futuras aplicaciones que exploten su tecnología.

Este capítulo se encuentra estructurado en tres secciones. En la sección 5.1 se exponen las conclusiones obtenidas sobre el retardo del protocolo; mientras que, en la sección 5.2 se concluye sobre su *throughput*. Finalmente, en la sección 5.3 se detallan trabajos futuros que se pueden desarrollar.

5.1. Conclusiones sobre el retardo

VNIBR-E presenta el menor retardo de todos los protocolos implementados, entonces se puede afirmar que se consiguió cumplir con su principal requerimiento de diseño. Esto se puede sustentar con el análisis de resultados. Como es de esperarse, esta métrica aumenta en función de la densidad vehicular y el número de intersecciones a las que se llega, porque se tiene que cubrir un área más extensa; pero debido a que VNIBR-E no crea rutas, no pierde tiempo y

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

propone un mejor rendimiento que AODV y OLSR. Al hablar del número de intersecciones que se alcanza, AODV y OLSR dependen en gran medida de la densidad vehicular, ya que tienen problemas cuando es baja o alta. Cuando es baja, no se pueden establecer rutas con facilidad debido a que no todos los vehículos se encuentran cerca y se da una ruptura de enlaces; mientras que, cuando es alta, tampoco se pueden establecer rutas, pero esta vez es debido a la gran sobrecarga presente en la red por los procesos de descubrimiento de ruta. En cambio, VNIBR-E no tiene este problema porque, al manejar una comunicación *unicast* líder a líder, no sobrecarga la red y sólo depende de sus líderes. Por este motivo, puede alcanzar el número de intersecciones deseado. Finalmente, los retardos que presentan los protocolos en los peores escenarios de simulación se muestran en la Tabla 2, demostrándose el alto rendimiento que tiene VNIBR-E en una situación de emergencia.

| | Retardo [ms] <i>Intersecciones: 1</i> <i>densidad vehicular:</i> <i>10</i> | Retardo [ms] <i>Intersecciones: 4</i> <i>densidad vehicular:</i> <i>100</i> |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| AODV | 207.107 | 1188.251 |
| OLSR | 410.747 | 515.773 |
| VNIBR-E | 153.149 | 407.561 |

Tabla 2. Resultado de retardo en el peor y mejor escenario.

5.2. Conclusiones sobre el *throughput*

VNIBR-E presenta el mejor *throughput* en la mayoría de casos a excepción de cuando se llega a una intersección con la densidad vehicular más baja. En este caso, se tiene un rendimiento un poco menor que AODV debido a que se puede notar el retardo y pérdida de información que ocasiona la caída de un líder. En los demás casos se tiene un *throughput* que supera ampliamente el rendimiento de los demás protocolos. Esto se debe a las ventajas que tiene el uso de una comunicación *unicast* líder a líder y el sistema de respaldo de los backups. Por este motivo, no se sobrecarga la red ni se dan colisiones o pérdida de paquetes significativas, como sucede en los procesos de descubrimiento de ruta. Añadir tráfico real, emulado por una CBR fue de gran importancia, porque permite respaldar una situación real. Obtener un bajo rendimiento en esta métrica, significa que no todos los mensajes de emergencia están llegando a su destino y por lo tanto el funcionamiento del sistema es pobre.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Con VNIBR-E se alcanzan valores extremadamente altos, en comparación a los otros protocolos, lo que significa que un gran porcentaje de los mensajes está llegando a su destino y, por lo tanto, la información de emergencia está llegando a un grupo adecuado de conductores. En la Tabla 3, se muestran los resultados de *throughput* de los protocolos en los peores escenarios de simulación, demostrándose la alta capacidad de VNIBR-E.

| | Throughput [Kbps] <i>Intersecciones: 1</i> <i>densidad vehicular:</i> <i>10</i> | Throughput [Kbps] <i>Intersecciones: 4</i> <i>densidad vehicular:</i> <i>100</i> |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| AODV | 265.711 | 12.584 |
| OLSR | 156.545 | 50.850 |
| VNIBR-E | 197.453 | 1226.470 |

Tabla 3. Resultado de *throughput* los peores escenarios de simulación.

Con los resultados obtenidos se puede concluir que VNIBR-E tiene mejor rendimiento, en retardo y *throughput*, que AODV y OLSR, pero para garantizar su éxito, se lo comparó con los resultados publicados en [41]. En este estudio se dice que para un *throughput* de 1000 Kbps se tiene un retardo de 0.386 s. En este proyecto se obtuvo que para un *throughput* de 1226.470 Kbps se tiene un retardo de 0.407 s, lo que significa una mejora del 16.158%.

5.3. Trabajo Futuro

El trabajo realizado demuestra las ventajas que presenta el uso de la capa virtual, por lo que se propone seguir explotando el protocolo VNIBR para crear aplicaciones que puedan dar soporte a diferentes tecnologías. Con la comunicación entre líderes, que ocasiona una baja sobrecarga en la red, se puede implementar un juego de roles en el que participen los pasajeros de cada vehículo. Cada líder sería el encargado de comunicarse con un servidor del juego y así dar soporte al papel que cada jugador tendría. Esto, al aplicarse en vehículos que realizan largos viajes, podría ayudar notablemente a reducir el estrés post-viaje de los pasajeros. Puntualmente, con respecto a VNIBR-E se plantea seguir trabajando y añadir *video streaming* a la transmisión de mensajes, para brindar video de situaciones de emergencia a cada conductor en tiempo real.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. An, B.-H. Lee, y D.-R. Shin, “A Survey of Intelligent Transportation Systems”, 2011, pp. 332-337.
- [2] J. A. Hough, C. Bahe, M. L. Murphy, y J. Swenson, “Intelligent Transportation Systems: Helping Public Transit Support Welfare to Work Initiatives”, Upper Great Plains Transportation Institute North Dakota State University, 2002.
- [3] R. Bishop, “A survey of intelligent vehicle applications worldwide”, Intelligent Vehicles Symposium, 2000. IV 2000. Proceedings of the IEEE, 2000, pp. 25-30.
- [4] M. L. Sichitiu; M. Kihl, “Inter-vehicle communication systems: a survey”, IEEE Commun. Surveys & Tutorials, vol. 10, no. 2, pp. 88-105, Second Quarter 2008.
- [5] X. Fan, B. Yang, R. Yamamoto, y Y. Tanaka, “Road side unit assisted stochastic multi-hop broadcast scheme for instant emergency message propagation”, 2014, pp. 103-108.
- [6] P. Mishra y A. Jaiswal, “Design Approach for Accidents Notification in Vehicular Ad Hoc Network”, 2015, pp. 164-168.
- [7] S. Dolev, S. Gilbert, N. A. Lynch, E. Schiller, A. A. Shvartsman, y J. L. Welch, “Virtual mobile nodes for mobile ad hoc networks”, en International Symposium on Distributed Computing, 2004, pp. 230-244.
- [8] J. F. Bravo-Torres, M. Lopez-Nores, y Y. Blanco-Fernandez, “Experiences with virtual mobile nodes that do move in vehicular ad hoc networks”, 2012, pp. 1-5.
- [9] J. F. Bravo-Torres, M. López-Nores, Y. Blanco-Fernández, J. J. Pazos-Arias, y E. F. Ordóñez-Morales, “VaNetLayer: A virtualization layer supporting access to web contents from within vehicular networks”, Journal of Computational Science, vol. 11, pp. 185-195, nov. 2015.
- [10] World Health Organization, “Infographics on global road safety 2013”, Violence and Injury Prevention, 2013.
- [11] Cheng-Wei Fan, Ke-Chian Su, Hei-Min Wu, Wei-Lin Chang, y Yao-Hsin Chou, “An effective multi-hop broadcast control mechanism for emergency alert message in VANET”, 2012, pp. 791-795.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [12] A. Buchenscheit, F. Schaub, F. Kargl, y M. Weber, "A VANET-based emergency vehicle warning system", 2009, pp. 1-8.
- [13] G. Dimitrakopoulos y P. Demestichas, "Intelligent transportation systems", IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 5, n.º 1, pp. 77-84, 2010.
- [14] M. A. Regan, J. A. Oxley, S. T. Godley, y C. Tingvall, Intelligent transport systems: Safety and human factors issues. 2001.
- [15] G. Karagiannis et al., "Vehicular Networking: A Survey and Tutorial on Requirements, Architectures, Challenges, Standards and Solutions", IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 13, n.º 4, pp. 584-616, 2011.
- [16] M. Sichitiu y M. Kihl, "Inter-vehicle communication systems: a survey", IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 10, n.o 2, pp. 88-105, 2008.
- [17] Beying Deng y Xufeng Zhang, "Car networking application in vehicle safety", 2014, pp. 834-837.
- [18] U. D. Gandhi, A. Singh, A. Mukherjee, y A. Chandak, "Smart vehicle connectivity for safety applications", 2014, pp. 262-266.
- [19] ETSITR102638, Intelligent Transport System (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definition, ETSI Std. ETSI ITS Specification TR 102 638 version 1.1.1, June 2009
- [20] CVIS D2.2, "Use cases and system requirements," IST CVIS Project, CVIS IST-4-027293-IP deliverable D2.2 version 1.0, 2006.
- [21] G. Singh, D. Bansal, y S. Sofat, "Intelligent Transportation System for Developing Countries A Survey", International Journal of Computer Applications, vol. 85, n.º 3, pp. 34-38, ene. 2014.
- [22] C. R. Berger y E. Smith, "Intelligent Transportation Systems Provide Operational Benefits for New York Metropolitan Area Roadways: A Systems Engineering Approach", 2007, pp. 1-8.
- [23] A. Rakhshan y H. Pishro-Nik, "A new approach to customization of accident warning systems to individual drivers", 2016, pp. 219-225.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [24] Weixia Li, Guoyuan Wu, M. J. Barth, y Yi Zhang, “Safety, mobility and environmental sustainability of Eco-Approach and Departure application at signalized intersections: A simulation study”, 2016, pp. 1109-1114.
- [25] Vicerrectoría Administrativa, “Plan Estratégico de Seguridad Vial”, Universidad de la Salle, Bogotá (Colombia), 2015.
- [26] T. Vaa, M. Penttinen, y I. Spyropoulou, “Intelligent transport systems and effects on road traffic accidents: state of the art”, IET Intelligent Transport Systems, vol. 1, n.º 2, pp. 81-88, 2007.
- [27] N. Vineeth y H. S. Guruprasad, “Performance analysis of network coded video streams in VANETs based on mobility models”, 2015, pp. 170-175.
- [28] Yue Liu, J. Bi, y Ju Yang, “Research on Vehicular Ad Hoc Networks”, 2009, pp. 4430-4435.
- [29] M. S. Sahasrabudhe y D. M. Chawla, “Survey of Applications based on Vehicular Ad-Hoc Network (VANET) Framework”, International Journal of Computer Science and Information Technologies, vol. 5, n.º 3, pp. 3937–3942, 2014.
- [30] S. Al-Sultan, M. M. Al-Doori, A. H. Al-Bayatti, y H. Zedan, “A comprehensive survey on vehicular Ad Hoc network”, Journal of Network and Computer Applications, vol. 37, pp. 380-392, ene. 2014.
- [31] B. Patel y K. Shah, “A Survey on Vehicular Ad hoc Networks”, IOSR Journal of Computer Engineering, vol. 15, n.º 4, pp. 34-42, dic. 2013.
- [32] L. Criollo y J. Duchitanga, “Análisis de simulación de video streaming sobre redes vehiculares ad-hoc mediante el uso de software libre”, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2016.
- [33] S. Singh y S. Agrawal, “VANET routing protocols: Issues and challenges”, 2014, pp. 1-5.
- [34] F. Li y Y. Wang, “Routing in vehicular ad hoc networks: A survey”, IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 2, n.º 2, pp. 12-22, 2007.
- [35] A. Batiste Troyano, “Protocolos de encaminamiento en redes inalámbricas mesh: un estudio teórico y experimental”, 2011.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [36] J. Hurtado y E. Siguenza, “Análisis del uso de nodos móviles virtuales para procesos de encaminamiento en redes vehiculares ad-hoc”, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2013.
- [37] J. F. Bravo-Torres, M. Lopez-Nores, J. V. Saians-Vazquez, Y. Blanco-Fernandez, y J. J. Pazos-Arias, “An Efficient Combination of Topological and Geographical Routing for VANETs on Top of a Virtualization Layer”, 2015, pp. 1-5.
- [38] Kim, Oanh Tran Thi, VanDung Nguyen, and Choong Seon Hong. “Which network simulation tool is better for simulating Vehicular Ad-hoc network?” 2014.
- [39] M. Behrisch, L. Bieker, J. Erdmann, y D. Krajzewicz, “SUMO—simulation of urban mobility: an overview”, en Proceedings of SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation, 2011.
- [40] S. Adibi, Ed., Quality of service architectures for wireless networks: performance metrics and management. Hershey, PA: Information Science Reference, 2010.
- [41] A. Vindasius y S. Stanaitis, “Analysis of Emergency Message Transmission Delays in Vehicular Wireless Mesh Network”, 2010, pp. 35-40.