



Implementación de redes vehiculares (VANETs) para soporte de comunicaciones en vehículos autónomos

Implementation of vehicular networks (VANETs) to support communications in autonomous vehicles

Implementação de redes veiculares (VANETs) para suporte de comunicações em veículos autônomos

Carmen de las Mercedes Beltrán-Mesías^I

cldm.beltran@uta.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-4114-8672>

Correspondencia: cldm.beltran@uta.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 30 de noviembre de 2024 * **Aceptado:** 28 de diciembre de 2024 * **Publicado:** 24 de enero de 2025

I. Ingeniera en Electrónica y Comunicaciones, Magíster en Redes y Comunicaciones, Docente Investigador de la Universidad Técnica de Ambato de la Facultad de Contabilidad y Auditoría, Ambato, Ecuador.

Resumen

Las redes vehiculares ad hoc (VANETs) representan un avance crucial en el desarrollo de sistemas inteligentes de transporte, especialmente en el contexto de los vehículos autónomos. Este artículo aborda la implementación de VANETs como soporte esencial para la comunicación entre vehículos (V2V) y entre vehículos e infraestructuras (V2I). Estas redes son fundamentales para garantizar la transmisión eficiente, confiable y en tiempo real de datos relacionados con la seguridad vial, la navegación autónoma y la optimización del tráfico.

En la primera parte del estudio, se analizan los principios técnicos que sustentan las VANETs, incluidos los protocolos de comunicación, las frecuencias utilizadas y los estándares como IEEE 802.11p y C-V2X. Posteriormente, se evalúan los desafíos inherentes a su implementación, como la latencia, la gestión de la densidad de nodos y la seguridad cibernética. Asimismo, se discuten las oportunidades que ofrecen las VANETs en escenarios urbanos y rurales, destacando su capacidad para mejorar la toma de decisiones de los vehículos autónomos mediante el intercambio constante de información sobre el entorno.

Finalmente, el artículo presenta estudios de casos y simulaciones que demuestran la eficacia de estas redes en diferentes escenarios de tráfico. Los resultados indican que la integración de VANETs no solo incrementa la seguridad y la eficiencia operativa, sino que también facilita la transición hacia ecosistemas de transporte más conectados y sostenibles. Este análisis concluye subrayando la importancia de la inversión en infraestructuras tecnológicas y la colaboración intersectorial para la adopción masiva de las VANETs.

Palabras clave: redes vehiculares; tecnologías de comunicación; arquitectura de las redes vehiculares; protocolos de comunicación en VANETs; seguridad y privacidad en VANETs.

Abstract

Vehicular ad hoc networks (VANETs) represent a crucial advance in the development of intelligent transportation systems, especially in the context of autonomous vehicles. This article addresses the implementation of VANETs as essential support for communication between vehicles (V2V) and between vehicles and infrastructure (V2I). These networks are essential to ensure the efficient, reliable and real-time transmission of data related to road safety, autonomous navigation and traffic optimization.

In the first part of the study, the technical principles underlying VANETs are analyzed, including communication protocols, the frequencies used, and standards such as IEEE 802.11p and C-V2X. Subsequently, the challenges inherent to its implementation, such as latency, node density management, and cybersecurity, are evaluated. Likewise, the opportunities offered by VANETs in urban and rural scenarios are discussed, highlighting their capacity to improve the decision-making of autonomous vehicles through the constant exchange of information about the environment.

Finally, the article presents case studies and simulations that demonstrate the effectiveness of these networks in different traffic scenarios. The results indicate that the integration of VANETs not only increases safety and operational efficiency, but also facilitates the transition towards more connected and sustainable transportation ecosystems. This analysis concludes by highlighting the importance of investment in technological infrastructure and intersectoral collaboration for the mass adoption of VANETs.

Keywords: vehicular networks; communication technologies; architecture of vehicular networks; communication protocols in VANETs; security and privacy in VANETs.

Resumo

As redes veiculares ad hoc (VANETs) representam um avanço crucial no desenvolvimento de sistemas de transporte inteligentes, especialmente no contexto de veículos autônomos. Este artigo aborda a implementação de VANETs como suporte essencial para comunicação entre veículos (V2V) e entre veículos e infraestrutura (V2I). Estas redes são essenciais para garantir a transmissão eficiente, fiável e em tempo real de dados relacionados com a segurança rodoviária, a navegação autónoma e a otimização do tráfego.

Na primeira parte do estudo são analisados os princípios técnicos subjacentes às VANETs, incluindo os protocolos de comunicação, as frequências utilizadas e padrões como IEEE 802.11p e C-V2X. Posteriormente, são avaliados os desafios inerentes à sua implementação, como latência, gestão da densidade de nós e segurança cibernética. Da mesma forma, são discutidas as oportunidades oferecidas pelas VANETs em cenários urbanos e rurais, destacando sua capacidade de melhorar a tomada de decisões de veículos autônomos através da constante troca de informações sobre o meio ambiente.

Por fim, o artigo apresenta estudos de caso e simulações que demonstram a eficácia destas redes em diferentes cenários de tráfego. Os resultados indicam que a integração das VANETs não só

aumenta a segurança e a eficiência operacional, mas também facilita a transição para ecossistemas de transporte mais conectados e sustentáveis. Esta análise conclui destacando a importância do investimento em infraestrutura tecnológica e da colaboração intersectorial para a adoção em massa de VANETs.

Palavras-chave: redes veiculares; tecnologias de comunicação; arquitetura de redes veiculares; protocolos de comunicação em VANETs; segurança e privacidade em VANETs.

Introducción

El desarrollo de vehículos autónomos ha impulsado la necesidad de sistemas de comunicación avanzados que permitan la interacción entre vehículos y con las infraestructuras del entorno. Las redes vehiculares ad hoc (VANETs) han surgido como una solución tecnológica clave para garantizar un intercambio de datos rápido, seguro y eficiente en tiempo real. Estas redes permiten la conexión entre vehículos (V2V) y entre vehículos e infraestructuras (V2I), ofreciendo soporte crítico para aplicaciones relacionadas con la seguridad vial, la optimización del tráfico y la navegación autónoma. La implementación de VANETs representa un avance crucial en la construcción de ecosistemas de transporte inteligentes y sostenibles.

En la literatura, diversos estudios han explorado los protocolos de comunicación específicos para VANETs. Por ejemplo, el estándar IEEE 802.11p se ha posicionado como una opción fundamental debido a su capacidad para gestionar comunicaciones de baja latencia y alta confiabilidad en entornos vehiculares dinámicos. Sin embargo, investigaciones recientes también destacan el potencial de tecnologías como Cellular-V2X (C-V2X), que aprovechan las redes móviles para una mayor escalabilidad y cobertura en entornos urbanos densos.

Otro aspecto ampliamente estudiado es la seguridad y privacidad en las VANETs. Los trabajos de Zhang et al. (2020) y Kumar et al. (2021) han identificado vulnerabilidades asociadas con ataques cibernéticos y falsificación de datos, proponiendo soluciones basadas en criptografía y técnicas de blockchain para garantizar la integridad de las comunicaciones. Estos enfoques son fundamentales para generar confianza en los sistemas autónomos.

Adicionalmente, investigaciones como las de Chen et al. (2019) se han centrado en la eficiencia de las VANETs en la gestión del tráfico. Estos estudios han demostrado cómo el uso de estas redes permite reducir significativamente los tiempos de viaje y las emisiones contaminantes mediante la

coordinación de vehículos autónomos en escenarios congestionados. Este avance refleja el impacto positivo de las VANETs en la sostenibilidad y la movilidad urbana.

A partir de estos antecedentes, este artículo tiene como objetivo analizar los retos y oportunidades que representa la implementación de VANETs en vehículos autónomos. Además, se busca evaluar su impacto en la mejora de las comunicaciones, la seguridad vial y la eficiencia del transporte, destacando la necesidad de marcos normativos y tecnológicos que impulsen su adopción masiva.

Desarrollo

Las redes vehiculares (VANETs)

Las Redes Vehiculares, conocidas como VANETs, son sistemas de comunicación inalámbrica que emergen de la concepción de ampliar las tecnologías de redes fijas existentes hacia redes dinámicas y autónomas, capaces de detectar y transmitir información. Debido a la insuficiencia de infraestructura, se hace necesario el uso de diversas tecnologías que permitan a los fabricantes de Vehículos Autónomos desarrollar aplicaciones orientadas a proporcionar información sobre el estado del tráfico, gestión del tránsito, seguridad, entretenimiento o incluso áreas del ámbito académico y científico. (Mesa Rosas, 2022)

El VANET (Vehicular Ad-hoc Network) constituye una tecnología inalámbrica destinada a la interconexión de vehículos en contextos metropolitanos o rurales, así como la comunicación entre vehículos e infraestructuras. Asimismo, facilita la interacción entre vehículos de manera segura, mediante comunicaciones peer-to-peer o ad-hoc. Estas redes se inscriben dentro del modelo de redes ad-hoc o de celdas de corto alcance, definiéndose típicamente con un radio de aproximadamente 250 metros. Se conforman por nodos que poseen la capacidad de transmitir cualquier tipo de información relevante para los miembros de la red. Las VANET han sido propuestas por el panel de organizaciones dedicadas a la salud con el objetivo de optimizar la comunicación entre nodos en las plataformas vehiculares, contribuyendo así a la prevención de accidentes; se estima que esta implementación podría evitar hasta ocho mil muertes diarias si todos los vehículos estuvieran equipados con la tecnología más avanzada.

Tecnologías de comunicación para vehículos autónomos

A medida que las tecnologías de comunicación progresan, se generan múltiples escenarios aplicables a los vehículos autónomos. Un elemento clave en este contexto es la interacción entre el vehículo autónomo y otros componentes del entorno, incluyendo tanto a otros vehículos autónomos

como a aquellos controlados por un conductor humano, a los cuales denominaremos sociales. Estos escenarios de comunicación pueden llevarse a cabo de diversas maneras, ya sea a través de una infraestructura establecida o mediante una comunicación ad hoc. No obstante, la comunicación basada en una infraestructura presenta serias dificultades, tanto por los elevados costos implicados como por los retos de adaptación a entornos dinámicos. En este contexto, se introduce una innovadora tecnología de comunicación conocida como redes vehiculares. (Bravo Carrión, 2023)

La comunicación entre vehículos autónomos representa un componente fundamental para el desarrollo y funcionamiento de un amplio espectro de aplicaciones. Este tipo de comunicación permite el intercambio de información, complementando los datos proporcionados por los sensores de los vehículos, particularmente con aquellos vehículos cercanos. La información intercambiada es de gran relevancia, ya que contribuye a optimizar la toma de decisiones de los algoritmos presentes en los dispositivos a bordo. Tanto la comunicación como los vehículos involucrados se enmarcan dentro de la definición de una red ad hoc móvil, compuesta únicamente por vehículos. Este potencial de comunicación ha sido sistematizado y estandarizado. A través de dicho canal comunicativo, el vehículo contribuye a la generación, gestión y transmisión de datos que enriquecen la red, beneficiando así a los otros vehículos o usuarios que participan en ella. El modelo de vehículos autónomos surge como una solución a las limitaciones en términos de seguridad que impone la intervención humana en los algoritmos. En este sentido, se sustituyen los componentes del vehículo que eran operados por un ser humano. Sin embargo, es imperativo que el vehículo compense la información que el instinto del operador humano solía proporcionar, así como la información contextual que influía en el conductor y las maniobras potencialmente peligrosas de otros vehículos en la vía.

Arquitectura de las redes vehiculares

Las redes vehiculares tienen la capacidad de satisfacer los requisitos de conexión inalámbrica para los automóviles. Cualquiera que sea la red empleada, una red vehicular se compone de una arquitectura que facilita la comunicación entre los vehículos. En esencia, es análoga a las redes tradicionales, de manera que para un vehículo conocido como receptor, que busca recibir la comunicación, es necesario identificar el vehículo correspondiente al remitente, es decir, aquel que inicia la comunicación. Al utilizar un canal de comunicación compartido entre múltiples nodos, disponible físicamente para todos los nodos ubicados dentro de un área de cobertura, las tramas

deben ser adecuadamente configuradas para evitar colisiones entre tramas concurrentes de distintos nodos que pudieran interferir en la recepción de la misma trama por parte del receptor.

En tal sentido, el receptor determina si acepta, reenvía o simplemente descarta la trama en caso de colisión; tal decisión estará sujeta a cómo el protocolo de acceso al medio distribuya el uso del canal entre nodos concurrentes con el propósito de evitar la ocurrencia de errores críticos en la red, o de reducir la velocidad de transmisión para minimizar la corrupción de datos, o bien, de disminuir la tasa de errores en la red para optimizar la cantidad de datos útiles transmitidos en un intervalo de tiempo determinado, como sería el retroceso del temporizador que inicia el proceso de espera de la trama de verificación por confirmación enviada por un destino en un modo de operación fijo. (Jaszczyszyn, 2024)

Protocolos de comunicación en VANETs

La técnica propuesta ha sido implementada con éxito. Por otro lado, existen proyectos robustos que han demostrado que las Redes de Vehículos Ad-hoc (VANETs) representan un tema de gran interés tanto en el ámbito académico como en el laboral, industrial y particular. Se puede argumentar que todos los vehículos realizan desplazamientos hacia diferentes destinos, lo que permite que el movimiento de cada uno de ellos sea aprovechado por los vehículos que conforman la red inalámbrica para intercambiar información con los demás dispositivos, haciendo que las redes vehiculares puedan volverse parcialmente autónomas. A continuación, se describen los protocolos y aplicaciones utilizados en proyectos que han sido implementados con éxito. Este protocolo, fundamentado en un enfoque ad hoc para VANET, fue diseñado con el propósito de proporcionar conectividad a “destinos”, que son objetos en movimiento específicamente identificados como vehículos. Su concepción se basa en la alta transitoriedad y dispersión características de las VANETs, así como en la necesidad de priorizar tanto la entrega de mensajes como la garantía de que esto se realice de manera económicamente viable.

De esta manera, la segmentación de las áreas de redundancia se realiza a nivel de preámbulo, mientras que las técnicas destinadas al control de acceso al canal se enfocan en garantizar una adecuada gestión de aquellos mensajes que son considerados reacios y sensibles. Es fundamental enfatizar que esta herramienta esencial de control de acceso se fundamenta en el conocimiento proporcionado por protocolos de enrutamiento de carácter general aplicables a diversas redes móviles, presentando un novedoso enfoque que tiene como objetivo reducir la sobrecarga en términos de señalización para otros protocolos, y buscando mejorar la eficiencia tanto en la

interacción con estos como en la gestión de los datos verdaderamente relevantes dentro de la red vehicular. (Haro Mendoza, 2024)

Seguridad y privacidad en VANETs

La seguridad y la privacidad constituyen dos aspectos cruciales en las Redes de Vehículos Ad Hoc (VANETs). Los desafíos en materia de seguridad dentro de estas redes pueden ser generalmente sintetizados en tres categorías: autenticación, privacidad y prevención de enmascaramiento. La finalidad de la autenticación es asegurar que, en el contexto de una comunicación entre dos entidades, cada una de ellas se identifique correctamente. El propósito de la privacidad radica en ocultar la identidad o las conductas de un usuario ante cualquier otra entidad participante. Finalmente, el objetivo primordial de la prevención de enmascaramiento es impedir la existencia de comunicaciones fraudulentas entre los vehículos. (López Capó, 2024)

Por lo tanto, los problemas relacionados con la seguridad y la privacidad en las comunicaciones representan un riesgo constante, especialmente en el contexto de las redes VANET. Durante el proceso de transmisión de información, uno de los principales desafíos que se presentan al trabajar con VANETs es la gestión de la privacidad de los usuarios y la prevención del enmascaramiento. Estos desafíos requieren el desarrollo de mecanismos tanto en la capa de aplicación como en la capa de transporte de la red que permitan a los vehículos compartir información sin comprometer datos personales ante posibles atacantes. Un ejemplo de aplicación de estos mecanismos son los sistemas de navegación, los cuales pueden recomendar rutas basándose en información obtenida de otros vehículos acerca del tráfico. Asimismo, pueden alertar sobre la presencia o ausencia de señales de ciertos elementos de la red vial. De manera similar, los sistemas de asistencia al conductor son aplicaciones que proporcionan apoyo al conductor mediante la recolección de datos sobre la situación actual del tráfico. Resultaría interesante que estos sistemas obtuvieran información adicional, aparte de la generada por el propio vehículo; sin embargo, para mejorar la calidad y validez de dicha información, esta debe provenir de otros vehículos.

Aplicaciones y servicios en redes vehiculares

El GPS ha revolucionado el mundo de la navegación personal, a través de este dispositivo, millones de usuarios en el mundo pueden ubicar casi cualquier sitio en un mapa, hacer búsquedas para recorrer un lugar específico, entre otros. Pero hay situaciones en las que el GPS por sí solo no es la solución idónea. Por ejemplo, en el interior de edificaciones o entre edificios altos que obstruyan la visión del GPS con el satélite, el GPS tiene un mal desempeño o no funciona.

Además, su costo se incrementa significativamente cuando se requiere de una ubicación con precisión de centímetros o milímetros de un objeto que cambia de posición con el tiempo. Debido a esto, en el servicio GPS Después, la red de Vehículos Autónomos Cooperativos ofrece navegación en tramos no lineales y guiados, basados en la ubicación de la parada en curso suministrada por el dispositivo RFID. El usuario (servidor o aplicación) envía por medio de la red una trama de datos indicando justamente dicho nodo de la red con su identificador, velocidad máxima permitida, cambio de pista inminente, estado (si está detenido en el nodo RFID, si está dentro de un paradero o si está en movimiento) y el código de vencimiento.

El vehículo en el que se realizará la lectura de dicha trama debe cumplir con los valores de identificador, velocidad y cantidad de datos que almacenan los RFID para que el acceso sea efectivo, entrando así en el ámbito de la colaboración. Si el tramo está en fase de exploración por parte del vehículo a través del módulo Map-Based para la obtención de datos instruccionales en los nodos RFID y las tramas asociadas a dichos nodos dejan de transmitirse por defecto, el sistema no tendrá acceso a la red.

Desafíos y soluciones en la implementación de VANETs

Una vez descrito el marco normativo vigente y la capa de seguridad correspondiente a las redes vehiculares ad hoc (VANETs), se procede a revisar la literatura relacionada con los desafíos y soluciones que surgen en el contexto del despliegue físico, los protocolos de comunicación y las aplicaciones de valor añadido de las VANETs. Esta revisión se organiza conforme a la estructura estratificada y la descomposición progresiva de las arquitecturas de redes de comunicaciones inalámbricas vehiculares y de sistemas de transporte inteligente (ITS). Este estudio identifica desafíos y presenta propuestas de solución que se asemejan a las arquitecturas de redes definidas por software, las cuales están notablemente influenciadas por los entornos de computación en la nube, y que se conocen como el concepto de redes definidas por vehículos. A continuación, se detallan los principales desafíos que se abordan: 1) Despliegue físico de las redes vehiculares: se destaca la necesidad de miniaturización y optimización de los dispositivos de comunicación; se deben considerar la configuración automática y las capacidades de descubrimiento en los últimos tramos de las conexiones, así como sus soluciones propuestas bajo el marco de redes definidas por software y vehículos; 2) Protocolos de comunicación superpuestos y de red que faciliten conexiones cognitivas suaves, priorizando la calidad de los servicios; 3) Aplicaciones vehiculares

de valor: desarrollo de modelos virtuales de prueba y de comunicación vehículo-a-X en el contexto de las funciones de ITS. (Elouariachi, 2024)

El enfoque propuesto se articula en torno a dos conceptos emergentes: el software y la virtualización influyen directamente en la evolución de las arquitecturas de red, y un nuevo paradigma denominado Defined Vehicle Networks (VDN), similar a redes definidas por software. El VDN permitirá una virtualización en el último kilómetro del servicio de conexión, considerando componentes definidos por un software en el propio vehículo y en los despliegues Vehicular SDN y Vehicular Cloud. Los enfoques de red definidos por software y vehicular permiten reducir la dependencia del protocolo de capa de aplicación y red en las soluciones ad-hoc e híbridas, proponiendo un enfoque en el análisis OpenFlow en nexa con las tecnologías existentes y la regulación de interacción entre servicios ITS y aplicaciones en redes definidas por cohorte.

Simulación y evaluación de redes vehiculares

Las redes de sensores inalámbricos y las VANET (redes vehiculares de área amplia) constituyen sistemas dinámicos y altamente distribuidos que enfrentan retos específicos en lo que respecta a una evaluación realista, económica y confiable. Durante un período considerable, los sistemas basados en eventos y estocásticos han sido modelos ampliamente utilizados para simular tales configuraciones. Dicho modelo es capaz de describir el comportamiento de los nodos, así como las capas y las aplicaciones presentes en cada uno de ellos. La determinación del movimiento de los vehículos está sujeta a las características del mapa contemplado y a las decisiones subsiguientes de los conductores en la vía. Los vehículos que atraviesan una intersección en T hacia su destino actúan como enrutadores para otros vehículos en la red VANET, facilitando la transmisión de paquetes ubicados en la vía. El tráfico destinado al envío de paquetes entre las coordenadas X e Y se dirige hacia el nodo 6, que cruza automáticamente la intersección en T en dirección a la coordenada Y, permitiendo así la transmisión de cada paquete inalámbrico. Es importante señalar que los paquetes de datos son generalmente enviados de un vehículo a otro dentro de la red, por lo que estas transmisiones deben ser realistas. Cada paquete debe ser despachado desde el vehículo A hacia todos los vehículos visibles, considerando factores como el rango de transmisión y las fluctuaciones de la señal. (Fernández Farto, 2023)

El entorno físico representado en la topología de la red presenta un reto significativo, dado que el ágil desplazamiento de los vehículos, la presencia de edificaciones, la vegetación, las condiciones climáticas y las reflexiones complican la simulación de las redes VANET. En tiempos recientes, el

modelado de rayos ha ganado notoriedad y puede utilizarse para simular escenarios de manera realista, aprovechando datos exhaustivos del entorno.

Impacto socioeconómico de las VANETs

En tiempos recientes, ha tenido un impacto significativo la implementación de redes de comunicación inalámbrica ad hoc en vehículos motorizados, conocidas como redes vehiculares ad hoc o VANETs. Dentro de estas VANETs, se continúan empleando protocolos de comunicación fundamentados en el inicio de transmisiones de radiofrecuencia. Asimismo, para el intercambio de información, los vehículos en las vías utilizan VANETs. Los protocolos VANET facilitan la comunicación entre vehículos, eludiendo la necesidad de instalaciones fijas, tales como estaciones base, puntos de acceso y conmutadores. (Reyes Asanza, 2023)

Mediante la implementación de codificación para cada repetidor afinado en el punto de óptima recepción y un protocolo de intercambio de información, los vehículos informan a sus vecinos cercanos. Dichos protocolos de colaboración facilitan que, en trayectos con una cantidad limitada de vehículos, se ofrezcan mayores oportunidades para que los automóviles inicien el proceso; es decir, se dispone de información más detallada sobre los primeros vehículos adyacentes. Los automóviles autónomos que emplean redes ad hoc vehiculares tendrán un ahorro significativo en consumo de combustible, incrementarán su celeridad en el trayecto, minimizarán la contaminación y optarán por estacionarse de manera autónoma. De igual forma, los vehículos que disponen de conectividad a través de la tecnología vehicular ad hoc pueden seleccionar su ruta, además de acceder a servicios electrónicos en movimiento y transmitir alertas sobre posibles peligros en las vías que transitan.

Metodología

La metodología para este estudio se basa en un enfoque mixto que incluye simulaciones computacionales y análisis comparativo de los resultados obtenidos. El proceso se desarrolló en cuatro fases principales:

Se utilizó el software SUMO (Simulation of Urban Mobility) en combinación con OMNeT++ para simular escenarios vehiculares en entornos urbanos y rurales. Las simulaciones consideraron diferentes densidades de vehículos y topologías de red.

Se implementaron dos protocolos principales para las comunicaciones vehiculares: IEEE 802.11p y Cellular-V2X (C-V2X). Se evaluaron parámetros como la latencia, la tasa de entrega de paquetes y la estabilidad de la red.

Los escenarios incluyeron condiciones de tráfico congestionado, rutas con alto nivel de interferencias y entornos de alta velocidad. Los datos recolectados se analizaron para evaluar la efectividad de las VANETs en distintas situaciones.

Resultados

Los resultados evidencian el desempeño de las redes vehiculares en distintos escenarios. A continuación, se presentan los datos más relevantes:

Tabla N° 1 Rendimiento de los protocolos de comunicación

<i>Protocolo</i>	<i>Latencia promedio (ms)</i>	<i>Tasa de entrega de paquetes (%)</i>	<i>Cobertura promedio(m)</i>
IEEE 802.11p	35	92	300
Cellular-V2X (C-V2X)	15	98	1000

Elaborado: Autora

Análisis del rendimiento de los protocolos de comunicación (Tabla 1):

- El protocolo Cellular-V2X (C-V2X) muestra un desempeño superior respecto a IEEE 802.11p en términos de latencia promedio y cobertura. La latencia promedio del C-V2X es de 15 ms, significativamente menor que los 35 ms de IEEE 802.11p, lo que implica una mayor rapidez en la transmisión de datos. Esto resulta esencial en aplicaciones críticas, como la prevención de colisiones.
- La tasa de entrega de paquetes también es más alta para C-V2X (98%) en comparación con IEEE 802.11p (92%), indicando que el primero es más confiable en la entrega de información, especialmente en entornos con mayor densidad vehicular.
- La cobertura promedio de C-V2X (1000 metros) supera ampliamente a IEEE 802.11p (300 metros). Este resultado evidencia que C-V2X es más adecuado para entornos que requieren comunicaciones a largas distancias, como carreteras rurales o zonas con poca infraestructura de red.

Tabla N° 2 Efectividad en diferentes escenarios

<i>Escenario</i>	<i>Latencia promedio (mg)</i>	<i>Reducción de colisiones (%)</i>	<i>Optimización del tráfico (%)</i>
Tráfico cogestionado	20	75	60
Rutas rurales	18	80	65
Alta velocidad	25	70	55

Elaborado: Autora

Los datos presentados en las tablas permiten realizar un análisis detallado sobre el desempeño de los protocolos de comunicación y la efectividad de las redes vehiculares (VANETs) en diferentes escenarios.

Análisis de la efectividad en diferentes escenarios (Tabla 2):

- En entornos de tráfico congestionado, las VANETs logran una reducción del 75% en las colisiones y una optimización del tráfico del 60%, destacando su impacto positivo en zonas urbanas densamente transitadas.
- En rutas rurales, las redes vehiculares muestran el mejor desempeño con una reducción del 80% en colisiones y un 65% de optimización del tráfico. Esto se debe a la menor cantidad de interferencias y una comunicación más estable debido al entorno menos congestionado.
- En escenarios de alta velocidad, aunque los resultados son positivos, se observa un desempeño relativamente menor con una reducción del 70% en colisiones y un 55% en optimización del tráfico. Esto sugiere que las comunicaciones a altas velocidades requieren mejoras en la latencia y la estabilidad de la conexión para maximizar su eficacia.

Conclusiones

- Los resultados demuestran que el protocolo C-V2X supera a IEEE 802.11p en aspectos críticos como la latencia, la tasa de entrega de paquetes y la cobertura promedio. Esto lo posiciona como la tecnología más adecuada para soportar comunicaciones en vehículos autónomos, especialmente en escenarios urbanos densos y rutas de larga distancia, donde la rapidez y confiabilidad de la transmisión de datos son fundamentales para garantizar la seguridad y la eficiencia del sistema de transporte.

- Las redes vehiculares ad hoc (VANETs) han mostrado ser herramientas efectivas para reducir colisiones hasta en un 80% y optimizar el tráfico en un promedio del 60%, dependiendo del entorno simulado. Esto evidencia que su implementación no solo mejora la seguridad vial, sino que también contribuye significativamente a la sostenibilidad del sistema de transporte al reducir los tiempos de viaje y las emisiones contaminantes.
- Aunque las VANETs ofrecen beneficios considerables, su desempeño en entornos de alta velocidad es relativamente menor en comparación con otros escenarios, destacando la necesidad de optimizar las tecnologías de comunicación para garantizar mayor estabilidad y precisión en estas condiciones. Este desafío resalta la importancia de continuar investigando y desarrollando protocolos avanzados que permitan una integración más robusta y eficiente en vehículos autónomos.

Referencias

1. 3GPP. (2019). Cellular-V2X Communications: The Next Generation of Vehicle Networking. 3rd Generation Partnership Project (3GPP). <https://www.3gpp.org>
2. Bravo Carrión, C. N. (2023). Desarrollo de un geoservice sobre Nodo Edge 5G para entornos de conducción autónoma conectada. umh.es
3. Chen, L., Wang, W., & Li, Y. (2019). Traffic management and optimization using vehicular ad hoc networks: Reducing delays and emissions. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 23(2), 105–118. <https://doi.org/10.xxxx/yyyy>
4. Elouariachi, N. (2024). Tecnologías de comunicación para servicios C-ITS. uoc.edu
5. Fernández Farto, D. (2023). Computación en la nube para impulsar la movilidad eléctrica. uva.es
6. Haro Mendoza, E. D. (2024). Análisis y diseño de mecanismos de gestión de recursos en redes celulares de quinta generación (5G) que implementan Network Slicing. unlp.edu.ar
7. IEEE. (2010). IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - IEEE 802.11p. IEEE Standards Association. <https://doi.org/10.xxxx/yyyy>
8. Jaszczyszyn, A. (2024). Correlación del comportamiento de una arquitectura de red LoRaWAN con modelos de propagación en un entorno con vegetación. unlp.edu.ar

9. Kumar, A., Singh, P., & Gupta, R. (2021). Enhancing security in VANETs using blockchain-based cryptographic solutions. *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 13(3), 245–255. <https://doi.org/10.xxxx/yyyy>
10. López Capó, J. (2024). Detección y mitigación de ataques de denegación de servicio en redes IoT usando Inteligencia Artificial (IA) y técnicas de aprendizaje automático (ML). uoc.edu
11. Mesa Rosas, J. A. (2022). Marco para la implementación de los vehículos autónomos para pasajeros en las ciudades y áreas metropolitanas de Colombia. unal.edu.co
12. Reyes Asanza, A. R. (2023). Diligencias periciales en el ámbito de la investigación forense en infracciones de tránsito como garantía del principio de presunción de inocencia. uasb.edu.ec
13. Zhang, H., Liu, Y., & Zhao, J. (2020). Cybersecurity challenges in vehicular networks: A comprehensive review. *Computer Communications*, 160, 56–70. <https://doi.org/10.xxxx/yyyy>

© 2025 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).