



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA DE PUEBLA**

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA

“Implementación de una Red Vehicular en modo  
Infraestructura para aplicaciones en Ciudades Inteligentes”

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**LICENCIADO EN ELECTRÓNICA**

PRESENTA  
**JUAN PASCUAL VÁSQUEZ RAMÍREZ**

ASESORES DE TESIS  
**DR. RICHARD TORREALBA MELÉNDEZ (FCE-BUAP)**  
**M.C. EDNA ILIANA TAMARIZ FLORES (FCC-BUAP)**

PUEBLA, PUE. NOVIEMBRE DE 2020

## DEDICATORIAS

*Dedico esta tesis a mis padres y hermanas quienes me apoyaron en todo momento durante mi formación escolar y estuvieron presentes en cada una de las noches de estudio y trabajo.*

*A Eilitia quien me dio el apoyo y motivación necesario cuando más lo necesite para continuar hasta el final.*

*A mis compañeros y amigos de clase quienes me apoyaron emocionalmente y acompañaron durante mi estancia en la carrera.*

*A mis maestros que nunca dejaron de aumentar mi conocimiento, siempre enseñándome algo nuevo incluso fuera del aula.*

*A los sinodales quienes estudiaron mi tesis.*

*A todos aquellos que me apoyaron para desarrollar, escribir y concluir esta tesis.*

*Para todos ellos es esta pequeña dedicatoria, que no se compara con el enorme apoyo incondicional que recibí.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis asesores, al Dr. Richard Torrealba Meléndez y la M.C. Edna Iliana Tamariz Flores por su apoyo y tiempo dedicado en el desarrollo de este proyecto de tesis.

Al laboratorio de Caracterización de Sistemas Basados en Microondas FCE-BUAP por permitirme realizar la parte inicial de las simulaciones de mi tesis.

A la Facultad de Ciencias de la Electrónica por la formación profesional, con valores transparentes y el reconocimiento en el ámbito laboral.

Por último, agradezco a mi alma mater, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por permitirme alcanzar mi meta y conseguir mi sueño estudiantil.

# Índice

Índice de Figuras.....	VI
Índice de Tablas.....	VIII
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1    Introducción.....	1
1.2    Antecedentes del Proyecto .....	2
1.3    Objetivos Generales y Específicos del Proyecto .....	3
1.4    Estado del Campo o del Arte.....	4
1.5    Aplicaciones existentes para asistencia vial.....	7
1.6    Conclusiones.....	10
Capítulo 2. Redes Vehiculares en Modo Infraestructura.....	11
2.1    Introducción.....	11
2.2    Redes Vehiculares en las Ciudades Inteligentes.....	11
2.3    Estandarización en las VANET.....	14
2.3.1    Acceso celular en ambiente vehicular (2G/2.5G/3G/4G) .....	14
2.3.2    Comunicación dedicada de corto alcance (DSRC).....	15
2.3.3    Acceso inalámbrico en entorno vehicular (WAVE) .....	16
2.3.4    WiMAX .....	17
2.3.5    IEEE 802.15.4 .....	17
2.4    Tipos de VANET .....	19
2.5    Infraestructura de una VANET.....	20
2.6    Conclusiones del capítulo 2 .....	22
Capítulo 3. Arquitectura del sistema.....	23
3.1    Introducción.....	23
3.2    Transmisión con el estándar IEEE 802.15.4 para la red vehicular .....	23
3.3    Esquema de implementación.....	25
3.4    Configuración y hardware de la red .....	26
3.5    Estructura de la trama IEEE 802.15.4 en la VANET .....	32
3.5.1    Análisis del RSSI.....	37
3.6    Conclusiones.....	38

Capítulo 4. Resultados finales .....	39
4.1 Introducción .....	39
4.2 Datos de las pruebas preliminares .....	39
4.3 VANET en modo Infraestructura y análisis de las tramas .....	40
4.3.1 Velocidad mínima .....	46
4.3.2 Velocidad máxima.....	46
4.3.3 Desconexiones de la red.....	46
4.3.4 RSSI.....	48
4.4 Conclusiones.....	48
Capítulo 5. Conclusiones y trabajo a futuro .....	49

# Índice de Figuras

Figura 1.1. Seguridad vial basada en una VANET [4].....	2
Figura 1.2. Aplicación Waze [11].....	7
Figura 1.3. Funcionamiento del sistema Lane Hazard Warning/Vista de las pruebas de campo del sistema [12].....	9
Figura 2.1. Las VANET en Ciudades Inteligentes [14].....	12
Figura 2.2. Pila de protocolos de una VANET [19].....	16
Figura 2.3. Capas del estándar IEEE 802.15.4.....	18
Figura 2.4. Topologías en IEEE 802.15.4 con los nodos en función.....	18
Figura 2.5. Arquitecturas de una VANET.....	19
Figura 2.6. VANET V2I básica.....	21
Figura 3.1. Trayectoria de datos en la red vehicular.....	24
Figura 3.2. Arquitectura de la red.....	25
Figura 3.3. Alfabot [22].....	26
Figura 3.4. Tarjeta Xenon, que será la transmisora/receptora de datos de los vehículos a la infraestructura [23].....	27
Figura 3.5. Tarjeta Particle Argon [24].....	28
Figura 3.6. Etapas de conexión de la red vehículo-infraestructura.....	28
Figura 3.7. Diagrama de flujo de la infraestructura.....	29
Figura 3.8. Foto sensor utilizado para medir la velocidad [25].....	30
Figura 3.9. Disco con ranuras para medir el número de pulsos [25].....	31
Figura 3.10. Estructura de lectura para la recepción y lectura de paquetes.....	33
Figura 3.11. Paquete de datos.....	33
Figura 3.12. Captura de transmisión de paquetes de los módulos en reposo.....	36
Figura 3.13. Representación del parámetro RSSI a partir de la comunicación del sniffer y dos módulo en reposo.....	38
Figura 4.1. Vehículos V1 y V2 con tarjeta Xenón para transmitir y recibir el mensaje.....	40
Figura 4.2. Módulo de la infraestructura en modo de espera de dato denotado por la tarjeta Argón.....	41
Figura 4.3. Modo en espera: trama tipo broadcast emitida por la infraestructura.....	41
Figura 4.4. Envío de mensaje de alerta por parte de V1.....	42

Figura 4.5. Módulo de la infraestructura en modo transmisor de mensaje de alerta por la tarjeta Argón.....	43
Figura 4.6. Recepción del mensaje de alerta: comunicación entre infraestructura y V1.....	43
Figura 4.7. Recepción de mensaje de alerta en el V2.....	44
Figura 4.8. Transmisión y recepción del mensaje entre infraestructura y V2.....	44
Figura 4.9. El módulo de V2 se reinicia y pasa al modo espera.....	45
Figura 4.10. Error en la recepción de trama.....	47
Figura 4.11. Error en la trama por comando desconocido.....	47
Figura 4.12. Recepción correcta del reconocimiento (Ack. req).....	47

# Índice de Tablas

Tabla I. Comparación del estado del arte en las VANET.....	6
Tabla II. Descripción de arquitecturas de una VANET.....	20
Tabla III. Definición de los campos del paquete.....	34
Tabla IV. Descripción de los campos en el intercambio de paquetes con los módulos en reposo...35	
Tabla V. Direcciones físicas de los módulos que conforman la red VANET.....	40
Tabla VI. Relación de tiempos en cada etapa con la velocidad mínima.....	46
Tabla VII. Relación de tiempos en cada etapa con la velocidad máxima.....	46

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1 Introducción

La globalización ha hecho que la gente emigre a la urbanización para encontrar mejores empleos. Debido a esto, el estilo de vida tan agitado en las ciudades, así como la distancia entre el lugar de trabajo y la casa que se habita provocan que el número de vehículos se vea incrementado en el camino provocando accidentes que consumen mucho tiempo de espera o disminución en la velocidad [1].

Con lo mencionado anteriormente, existen implementaciones de red que pueden ayudar a la seguridad del conductor y del vehículo en el camino.

La red vehicular ad hoc definida como VANET por sus siglas en inglés, es una red entre vehículos inteligentes equipados con unidades a bordo que permiten la comunicación vehículo a vehículo (V2V) así como la de vehículo a infraestructura (V2I) sobre el protocolo de la capa MAC 802.11p [2]. Estas redes VANET son parte de la familia de las Redes Móviles Ad hoc (Mobile Ad Hoc Network, MANET) que operan por medio de enlaces punto a punto sin infraestructura proporcionando la seguridad y comodidad a los usuarios debido al intercambio de mensajes que se tienen para otorgar diversos avisos [3].

En la parte de la seguridad vehicular, enfocado a las aplicaciones en Ciudades Inteligentes, se puede mencionar el prevenir accidentes, mejoras en la circulación vial y tiempos por medio del envío de mensajes de aviso en caso de que haya ocurrido un choque en el camino. De esta manera, por medio de una aplicación le puede informar al usuario de la disminución de la velocidad, tráfico denso, cambiar de ruta, entre otros. Esto se puede mostrar en la Figura 1.1.

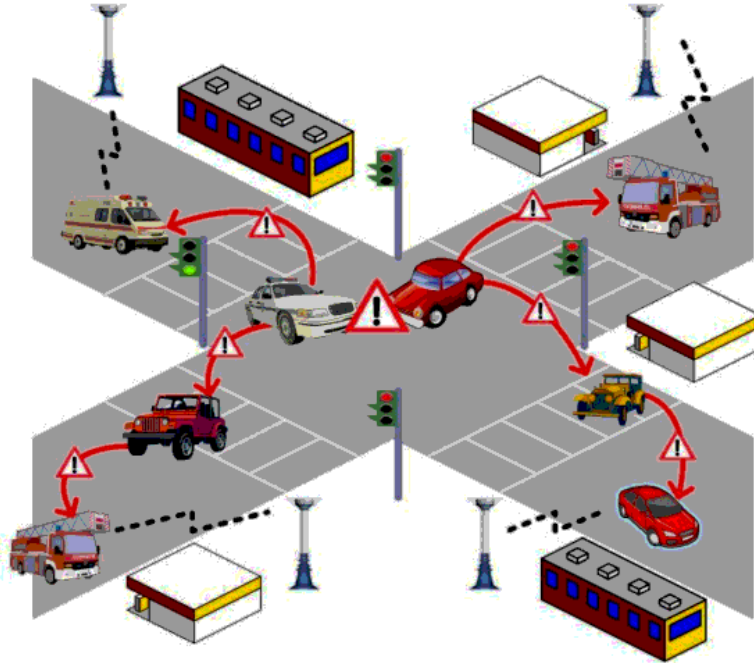


Figura 1.1. Seguridad vial basada en una VANET [4].

Por lo tanto, en esta tesis se plantea el estudio e implementación de una red vehicular en modo infraestructura V2I con enfoque para una aplicación en una Ciudad Inteligente y con esto, se pretende analizar el envío de mensajes entre los vehículos autónomos no tripulados en movimiento y la estación base que representa la Infraestructura de la red. De esta manera, el intercambio de mensajes en la red genera la información pertinente sobre algún incidente vial, previniendo una mejor circulación vial para los usuarios.

## 1.2 Antecedentes del Proyecto

El concepto de Ciudades Inteligentes ha llegado a desarrollarse y a aplicarse en diversas áreas de la tecnología con el fin de convertir a los países desarrollados y en vías de desarrollo en una realidad muy cercana debido a todo el avance científico y tecnológico en el que vivimos hoy en día. Un ejemplo de ello, son las

redes vehiculares ad hoc (VANETs) que se definen como redes auto-organizadas enfocadas a mejorar la seguridad y la eficiencia del tráfico vehicular.

Existen muchas dificultades en el diseño de la implementación en los sistemas VANETs, entre los que se pueden mencionar: seguridad, prevención de colisiones en la transmisión, protocolos de enrutamiento, conectividad, calidad de servicio (QoS) entre otros [5], generando que este tipo de redes sea inestable y vulnerable por los rápidos cambios de topología y un tiempo corto de vida del enlace entre los dispositivos por citar algunos. En [5] se menciona que la movilidad es considerada un reto porque puede causar dispersión en los nodos evitando una correcta entrega de los datos.

## 1.3 Objetivos Generales y Específicos del Proyecto

### **OBJETIVO GENERAL**

Implementar un prototipo de red inalámbrica VANET en modo V2I por medio del estándar IEEE 802.15.4 para prevenir al usuario de algún accidente a través del envío de mensajes.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estudiar las características del estándar IEEE 802.15.4 para el envío de mensajes en la red vehicular.
- Configurar los módulos de la empresa Particle para la implementación de la red.
- Diseñar e implementar una red inalámbrica VANET V2I con dos vehículos autómatas no tripulados en movimiento y un nodo estático que representa al Coordinador de la red IEEE 802.15.4.

- Analizar los datos de la comunicación entre los nodos de la red por medio de un sniffer.
- Realizar cambios de velocidad en los vehículos automátats no tripulados para determinar el desempeño de la red.

## 1.4 Estado del Campo o del Arte

Se presentan trabajos destacados en los temas de la seguridad e implementación de las VANETs.

1. Jaballah, W., et al. [6] realizaron una simulación en el software dedicado a redes NS-2 bajo el estándar 802.11p, en donde se destaca la importancia de la seguridad en un escenario de redes vehiculares. Para ello, llevaron a cabo sistemas de aviso de accidentes y realizaron una evaluación completa sobre el desempeño de la red bajo un esquema de ataques de “engaño”, esto es, que generaron como tráfico de fondo vehículos maliciosos, los cuales provocaban retardos en los mensajes de alerta. Finalmente, los autores determinan el impacto que pueden tener los vehículos maliciosos en este tipo de redes.
2. Mukherjee J. C., et al., [7] proponen una trama para notificar eventos que se basan en la publicación de los eventos y la conexión entre los vehículos, que para ello utilizan las unidades de carretera (RSU) para entregar estos avisos de eventos a los vehículos que se conectan a ellos dentro de los periodos de validez en las conexiones, así como de los eventos. Este trabajo se enfoca en resolver problemas como el de maximizar solo el número de conexiones que coinciden con algunos de los avisos de dichos eventos. El siguiente problema que definen como objetivo es el de minimizar el costo total de la difusión de los avisos de los eventos. El modelo funciona de la siguiente manera; los vehículos se conectan a un único Proveedor de Servicios (SP) para tipos específicos de eventos a través de la RSU. De esta manera los

avisos de eventos también se informan al SP. Así, un vehículo puede recibir un aviso de un evento a través de la RSU que se encuentra en su ruta. El trabajo se realizó únicamente en la propuesta de algoritmos para resolver el planteamiento de los dos problemas anteriormente mencionados y sus resultados fueron basados únicamente en simulación.

3. Hu S., et al., [8] realizan una comparación sobre el desempeño de 4 protocolos de enrutamiento: AODV, DSR, OLSR y AODVUU para una VANET en un ambiente de simulación utilizando el simulador de redes NS2.35 y el modelo de tráfico VanetMobiSim, incluyendo el modelo de tráfico de luces y el modelo de movimiento de conducción inteligente para generar diferentes escenarios de simulación. Finalmente, utilizan tres nodos implementados en una red ad-hoc basados en vehículos embebidos para evaluar lo mencionado anteriormente.
4. Wang Y., et al., [9] presentan el diseño y su comprobación en simulación de un programa que incluye la funcionalidad básica del Sistema de Transporte Inteligente (ITS), principalmente de dos sub-aplicaciones de seguridad: luces de freno electrónicas de emergencia y advertencia de colisión de intersección. La parte interesante de este trabajo es que diseñaron la aplicación de la VANET basada en el protocolo WAVE, Acceso Inalámbrico en un Ambiente Vehicular que es el protocolo propuesto por la IEEE en el 2013 bajo el estándar IEEE 802.11p, estándares IEEE 1609 y el estándar SAE J2735. Este protocolo WAVE, además de cumplir con los requisitos para el intercambio de datos en el entorno de alta velocidad, también aplicaciones de seguridad con recursos de hardware existentes. Es capaz de resaltar la presión del tráfico, prevenir el accidente de tráfico y seguir la tendencia de internet móvil.
5. Herrera M. M., [10] es una tesis de Licenciatura de la Facultad de Ciencias de la Computación de esta misma casa de estudios donde se realizó una simulación de una VANET en modo vehículo a vehículo persiguiendo el

mismo objetivo de mandar mensajes de aviso sobre algún accidente. Cabe mencionar que la red se basó en el protocolo IPv6 para redes de baja potencia.

En la siguiente Tabla I, se muestra un resumen comparativo sobre el estado del arte de las VANET con la propuesta de trabajo para este proyecto de tesis.

Tabla I. Comparación del estado del arte en las VANET.

Referencia	Año	Simulación	Implementación	Caso de estudio
Jaballah, W., et al. [6]	2016	✓	x	Utilizan el estándar 802.11p para sistemas de aviso de accidentes y realizaron una evaluación completa sobre el desempeño de la red.
Mukherjee J. C., et al., [7]	2016	✓	x	Proponen una trama para notificar eventos que se basan en la publicación de los eventos y la conexión entre los vehículos
Hu S., et al., [8]	2017	✓	✓	Realizaron una comparación sobre el desempeño de 4 protocolos de enrutamiento.
Wang Y., et al., [9]	2017	✓	x	Función básica ITS para dos sub-aplicaciones de seguridad: luces de freno electrónicas de emergencia y advertencia de colisión de intersección, usando el protocolo WAVE.
Herrera M. M., [10]	2019	✓	x	Simulación de una VANET V2V usando redes 6LoWPAN.
Tesis	2020	x	✓	Análisis del comportamiento de la red móvil para una VANET V2I.

## 1.5 Aplicaciones existentes para asistencia vial

Existen distintas aplicaciones enfocadas en la asistencia vial, en la que se destaca por ser la más utilizada y popular en México, WAZE mostrada en la Figura 1.2, que es una aplicación de navegación GPS detallada totalmente gratuita que proporciona información sobre el tráfico en tiempo real, además de todo tipo de elementos sociales interesante y de geogaming que añaden diversión a los desplazamientos [11]. El funcionamiento de WAZE se explica a continuación.

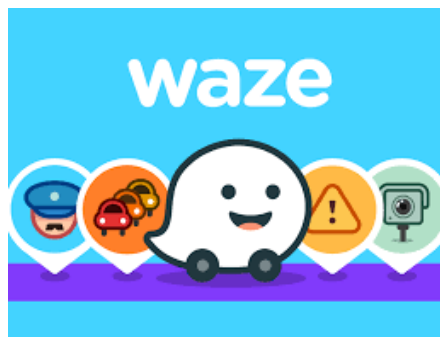


Figura 1.2. Aplicación Waze [11].

La aplicación Waze se mantiene abierta mientras se conduce, de esta manera se comparte información en tiempo real que se utiliza para conocer el estado del tráfico y las estructuras de las vías. WAZE utiliza la información que recolecta para calcular la velocidad media, comprobar si hay errores, mejorar el diseño de las vías y aprender el sentido de los giros y las vías. Los mapas y la navegación funcionan gracias a los usuarios. Cuantas más personas conduzcan con la aplicación abierta, más precisa será la navegación [11].

Waze se creó con la idea de que la conexión de red de datos estuviera activa durante todo o casi todo el tiempo. Para que todas las características de Waze funcionen, se debe tener la conexión de datos activada en el dispositivo móvil. Esta conexión proporciona a Waze información sobre el tráfico en tiempo

real y permite que el mapa esté actualizado. Sin una conexión a Internet, no se podrá localizar ninguna ruta ni se podrá desplazarse por ella [11]. Con lo anterior descrito se puede destacar el hecho de que la aplicación necesita conexión continua a Internet lo que presenta una desventaja con respecto a lo planteado en este trabajo puesto que las unidades a bordo (OBU) no necesitan de dicha conexión a Internet, pues al ser una red MANET la conexión entre estas y la unidad de carretera (RSU) no pasa por un tercer dispositivo, permitiendo así una conexión continua. Se menciona a su vez si la conexión a Internet es intermitente, Waze intentará obtener de los servidores datos sobre alertas y peligros relacionados con el tráfico, pero puede que no le proporcione al usuario información fiable. Además, si Waze no consigue volver a conectarse a sus servidores, no se podrá publicar los peligros [11]. Se tiene una problemática similar con la red vehicular V2I con respecto a la intermitencia en la conexión, sin embargo esto es algo común en las redes inalámbricas puesto que una red inalámbrica es vulnerable a distintos factores, en este caso, el principal factor es la frecuencia a la cual trabajan tanto las unidades a bordo como las unidades de camino (2.4 GHz), la cual es una frecuencia comúnmente utilizada por otros medios de comunicación como la red de telefonía, las red WiFi y las conexiones Bluetooth.

Además de las aplicaciones desarrolladas para el teléfono móvil, existen a su vez, sistemas que están siendo desarrollados por empresas vehiculares, tal es el caso del trabajo que está siendo realizado por la empresa Mitsubishi Electric Corporation en asociación con HERE Technologies los cuales han desarrollado un sistema que permite la alerta automática entre vehículos de los peligros próximos en carretera mientras se encuentra circulando en su carril.

En marzo de 2019, las dos compañías han completado satisfactoriamente pruebas de campo de su tecnología llamada, “Lane Hazard Warning” (Advertencia de Peligro en el Carril) en el estado de California, Estados Unidos, así como también en Ibaraki Prefectura de Japón [12].

“Lane Hazard Warning” permite que un evento detectado por los sensores de un vehículo, como un automóvil averiado o lento, una carretera resbaladiza,

escombros o un bache, se localice con precisión en un carril específico y esta información se transmita en tiempo real a través de la nube a otros vehículos acercándose a la misma área [12].

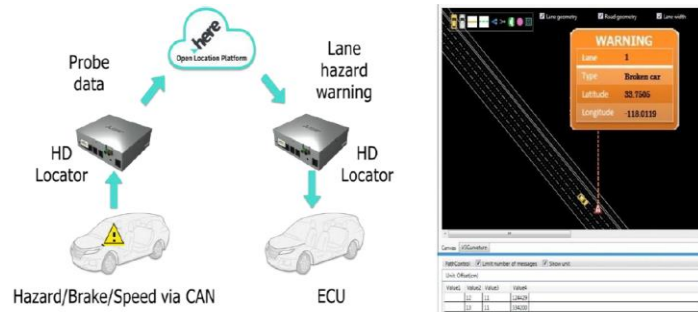


Figura 1.3. Funcionamiento del sistema Lane Hazard Warning / Vista de las pruebas de campo del sistema [12].

Lane Hazard Warning utiliza los sensores del vehículo junto con el Localizador HD, la tecnología precisa de posicionamiento a nivel de centímetro de Mitsubishi Electric y la Plataforma de Ubicación Abierta HERE, la plataforma colaborativa de datos de gran ubicación [12].

Lo anterior emula una red vehicular V2V, en la que el vehículo envía información a la nube por medio del Localizador HD, una vez en la nube una segunda unidad Localizadora HD recibe esa información para permitirle actuar al conductor con un mayor margen de tiempo, la principal desventaja que se puede apreciar con respecto a lo que se realizara en este trabajo es el hecho de que las unidades antes mencionadas requieren de una conexión continua a internet pues de otro modo no serían capaces de enviar información a la nube así como también de reenviar dicha información, a diferencia de las unidades a bordo (OBU) de la red V2I que se implementara, las cuales no requieren de ningún otro dispositivo para realizar el envío de datos, es decir, son las mismas unidades a bordo las que se comunican con la unidad de camino (RSU) y viceversa.

## 1.6 Conclusiones

En este capítulo se revisó el alcance de este trabajo, definiendo los objetivos que llevarán a precisar las características de una VANET V2I a través de su implementación, con ello se destaca que se realizará mediante vehículos automáticos no tripulados en movimiento y así poder revisar la transmisión en este tipo de redes. El trabajo se encuentra organizado en cinco capítulos los cuales se detallan a continuación: el Capítulo 2 presenta las redes vehiculares en modo infraestructura, señalando la parte teórica como sus elementos que la componen, así como los estándares; en el Capítulo 3 se describe la arquitectura del sistema, en donde se muestra los requerimientos necesarios para la implementación de la red. Por otro lado, los escenarios de la implementación para las pruebas preliminares y finales se explican en el Capítulo 4 que corresponde a los resultados finales, terminando esta tesis con las conclusiones y trabajo a futuro en el Capítulo 5.

# Capítulo 2. Redes Vehiculares en Modo Infraestructura

## 2.1 Introducción

En los presentes años se observa un gran avance en el campo de las comunicaciones vehiculares debido a que cada día crece la necesidad de tener vehículos inteligentes lo que permite tener un viaje seguro, eficiente y agradable. Gran cantidad de los vehículos modernos cuentan con sistemas integrados que monitorean el viaje de los usuarios por medios de sensores con el fin de disminuir los percances por errores humanos.

En este capítulo se revisará la parte teórica de las redes vehiculares para mostrar los elementos que la forman, así como estándares y además su forma de comunicación.

## 2.2 Redes Vehiculares en las Ciudades Inteligentes

Las ciudades son fábricas de información; grandes cantidades de datos son generados de distintas fuentes, cada día. Los esfuerzos son cada vez mayores para recopilar dichos datos del entorno urbano que están impulsados por promesas de mejoras para servicios o de productos para el público que van desde automóviles autónomos hasta edificios inteligentes y semáforos basados en datos [13].

El concepto de "Ciudad Inteligente" se propuso tanto para resolver cuellos de botella durante la urbanización como para apoyar el desarrollo urbano sostenible. Basándose en tecnologías eficientes de información y comunicación (TIC), una

Ciudad Inteligente es capaz de detectar, analizar e integrar información crítica en la operación y el desarrollo de una ciudad, incluida la información de seguridad pública, actividades industriales, servicios públicos sociales, etc. [3].

En la construcción de una Ciudad Inteligente, un Sistema de Transporte Inteligente (ITS) puede considerarse como la función más crucial dada la proliferación de vehículos y la constante expansión de las redes de carreteras [3].

Aunado a lo anterior corresponde a la parte de la creciente cantidad de vehículos en las ciudades debido a la urbanización y a la construcción de infraestructura de caminos. Resultado de ello, se han producido varios problemas, como el congestionamiento de los caminos, percances vehiculares y contaminación, por mencionar algunos ejemplos. En el intento de resolver las problemáticas antes mencionadas se han diseñado sistemas de monitorización del camino, tal es el caso de las redes VANET como se muestra en la Figura 2.1.

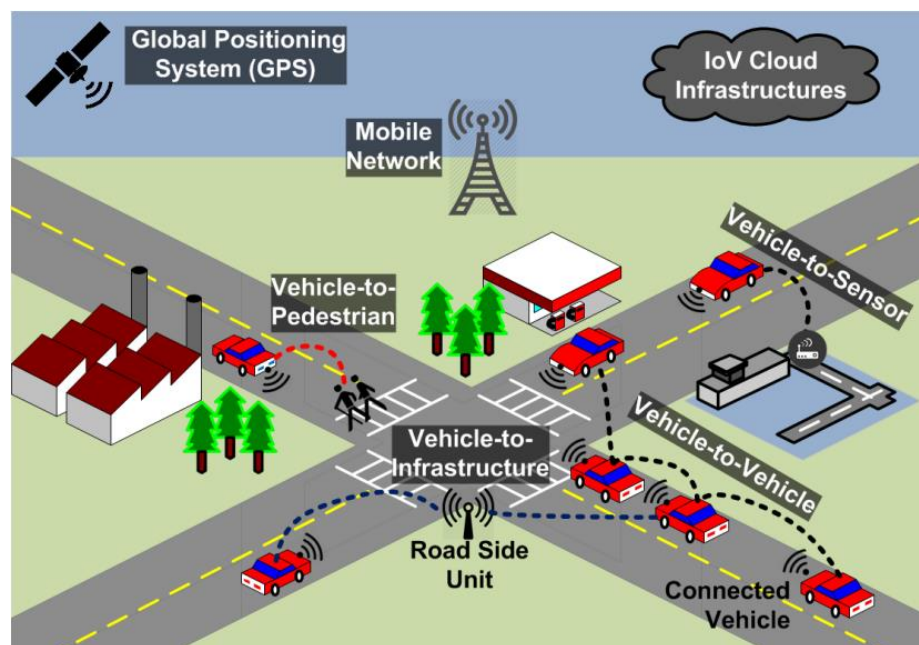


Figura 2.1. Las VANET en Ciudades Inteligentes [14].

En dichas redes, los autos son capaces de interactuar con distintos objetos en el futuro, creando complejos ecosistemas los cuales serán acoplables a distintos usuarios. Este desarrollo tecnológico lleva por nombre comunicación vehículo-a cualquier cosa (V2X) [15]. Ejemplos de la comunicación V2X es la comunicación vehículo a infraestructura (V2I) y la comunicación vehículo a vehículo, las cuales serán profundizadas en posteriores secciones. VANET se caracteriza por sus actividades auto organizadas y autónomas, donde las entidades en VANET pueden trabajar como clientes y/o servidores para intercambiar y compartir información de tráfico [16].

En una VANET existen cuatro tipos básicos de mensajes que pueden intercambiarse entre vehículos e infraestructuras, los cuales se muestran a continuación:

- Mensajes de emergencia y advertencia: los mensajes de emergencia pueden incluir cualquier tipo de emergencia crítica, como accidentes, paso de ambulancia, bomberos o vehículos policiales. Las advertencias con respecto a la reparación en carreteras, la congestión del tráfico entra en la categoría de mensajes de advertencia.
- Mensajes interpersonales: los mensajes relacionados con el perfil de un conductor y otros pasajeros en el vehículo.
- Mensajes de enrutamiento y seguridad: Los mensajes de seguridad toman la información relacionada con la velocidad, posición, dirección e identidad del vehículo, etc. para una comunicación segura.
- Mensajes de información y entretenimiento: Los tipos de mensajes en esta categoría son la información sobre puntos de comida cercanos, estaciones de servicio de gas o gasolina, puntos de interés cercanos, etc. [17].

Se plantea entonces que las redes vehiculares toman un papel importante en el creciente desarrollo de las Ciudades Inteligentes, pues con ellas se planea optimizar el tráfico en camino, permitiendo así un viaje más seguro y rápido para los pasajeros.

## 2.3 Estandarización en las VANET

Existen varios estándares inalámbricos disponibles para proporcionar el acceso de radio requerido por los vehículos para comunicarse a través de la comunicación de vehículo a vehículo, comunicación de vehículo a infraestructura. El objetivo principal de estos estándares de comunicación es mejorar la seguridad vial, la eficiencia del tráfico y proporcionar la facilidad del conductor y el pasajero al permitir un conjunto de aplicaciones de confort [17].

### 2.3.1 Acceso celular en ambiente vehicular (2G/2.5G/3G/4G)

El concepto de acceso celular se basa en la reutilización de la frecuencia limitada disponible para los servicios. El sistema global para comunicación móvil (GSM) es el estándar de sistema celular más antiguo que proporciona una velocidad de datos máxima de hasta 9.6 Kbps [17].

En [16] se menciona las características de distintas tecnologías, como la 2.5G que es capaz de permitir una tasa de transmisión de 170 Kbps, sin embargo, tenía un problema muy grande, no era capaz de transmitir datos multimedia a una tasa de transmisión alta. Lo que permitió el nacimiento de la tecnología 3G, que permitía una tasa de transmisión a 2 Mbps. La motivación principal detrás del uso del sistema celular es hacer uso de la infraestructura existente. Pero en el entorno celular, la desventaja es el alto retraso o latencia debido a la participación de las estaciones base.

En 5G-VANET, el control sobre las redes vehiculares se puede realizar para programar una distribución de contenido eficiente, ya que el borde (edge computing) tiene una cantidad significativa de poder de cómputo y puede conocer la información de contexto sobre los nodos dentro de su cobertura. En consecuencia, una integración profunda entre transmisión, almacenamiento y computación es compatible con 5G-VANET [18].

Se plantea en [18] que al tener vehículos con características distintivas como movimiento rápido, topología de red que cambia rápidamente y baja latencia, tienen demandas especiales en la transmisión de datos, debido a la cantidad y calidad que requieren para una correcta transmisión y recepción. La primera demanda corresponde a la habilitación de conexión de varios nodos de comunicación y la segunda demanda es utilizar plenamente el tráfico por carretera desequilibrado y los atributos sociales heterogéneos de los vehículos. Para la solución de dichas demandas se plantea en [18] una arquitectura jerárquica basada en “edge computing” para una eficiente transmisión de datos. Teniendo así resultados favorables en las simulaciones realizadas.

### 2.3.2 Comunicación dedicada de corto alcance (DSRC)

Es un servicio de comunicación de corto a mediano alcance basado en el estándar IEEE 802.11p, que a su vez se deriva del estándar IEEE 802.11a. El objetivo de DSRC es admitir operaciones de baja sobrecarga en la comunicación. Estas comunicaciones pueden incluir información sobre el tráfico, información sobre accidentes, condiciones de la carretera, mensajes de seguridad entre vehículos, cobro de peajes, pago por conducir, etc. DSRC se utiliza principalmente durante la comunicación para proporcionar una alta transferencia de datos con un bajo retraso de comunicación o latencia.

Cabe mencionar que DSRC utiliza una frecuencia con licencia libre. Se administra de forma gratuita ya que no se cobra su uso del espectro, sino que restringe el uso del espectro para evitar la congestión; necesita tener licencia [17].

Lo anterior hace referencia al hecho de que debido a que si se requiere el uso de una frecuencia en específico se debe tener la licencia para evitar el congestionamiento sobre esa frecuencia en particular.

### 2.3.3 Acceso inalámbrico en entorno vehicular (WAVE)

La fidelidad inalámbrica por sus siglas en inglés Wi-Fi o la red de área local inalámbrica (WLAN) se utilizan para proporcionar acceso inalámbrico en redes vehiculares para permitir la comunicación de vehículo a vehículo o la comunicación de vehículo a infraestructura. El sistema WLAN tiene menos retardo o latencia, pero el uso de una red de área local inalámbrica requiere una infraestructura adicional, como adaptadores y enrutadores inalámbricos, que conlleva un costo adicional por su uso. Los estándares de la familia IEEE 802.11 se utilizan para proporcionar la conectividad inalámbrica. El acceso inalámbrico en un entorno vehicular (WAVE) es el estándar que se obtiene al combinar todo el conjunto de protocolos DSRC que incluye los estándares IEEE 802.11p e IEEE 1609. En la Figura 2.2 se muestra el stack de protocolos de una VANET.

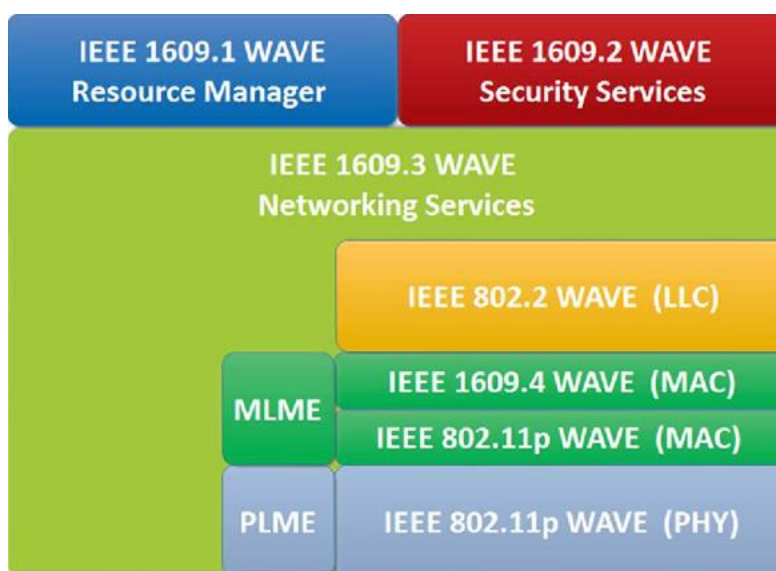


Figura 2.2. Pila de protocolos de una VANET [19].

Como se puede observar de la Figura 2.2, el estándar IEEE 1609 se compone por normas utilizadas en el modelo de comunicación como la estructura de gestión, mecanismos de seguridad y el acceso físico en el rango de 5.85-5.925 GHz para las comunicaciones en el entorno de las redes WAVE, debido a que las VANET se

centran en la intercomunicación a un corto alcance para interconectarse cuando cualquier automóvil se una o abandone las regiones de la red [10].

La desventaja de usar el IEEE 802.11 tradicional en la comunicación vehicular es la sobrecarga generada a una tasa significativa. Por ejemplo, para garantizar una comunicación vehicular oportuna, se requieren intercambios rápidos de datos [17].

### 2.3.4 WiMAX

WiMAX (interoperabilidad mundial para acceso de microondas) es una modificación del estándar IEEE 802.16e para proporcionar una alta velocidad de datos. WiMAX ofrece un amplio rango de transmisión, alta calidad de servicio y estándares de comunicación confiables que lo hacen adecuado para todas las aplicaciones que requieren características especiales como multimedia, video y voz sobre el Protocolo de Internet (VoIP). Utiliza el estándar IEEE 802.11 para infraestructura fija y el estándar IEEE 802.16 para usuarios móviles [17].

### 2.3.5 IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 se usa ampliamente en las redes inalámbricas de sensores (WSN), porque ofrece las capas inferiores fundamentales para un tipo de red inalámbrica de área personal (WPAN) que se centra en la comunicación ubicua de bajo costo y baja velocidad entre dispositivos como se muestra en la Figura 2.3, donde la primera capa corresponde a la capa física (PHY), que especifica las frecuencias de radio (RF) y tasas de transmisión, entre otras propiedades. La segunda capa es la de Control de Acceso Medio (MAC), que permite el acceso al canal físico, además realiza la gestión y el mantenimiento de la red PAN [20].

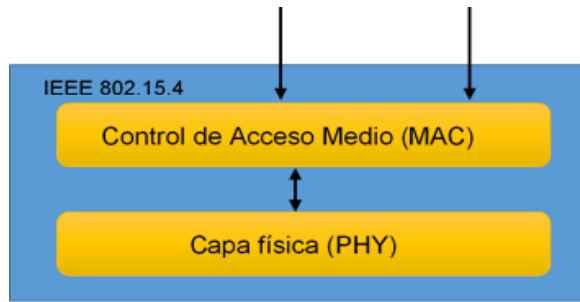


Figura 2.3. Capas del estándar IEEE 802.15.4.

El marco básico concibe un rango de comunicación de 10 metros con una velocidad de transferencia de 250 Kbit/s a 2.4 GHz [21].

Debido a su forma de comunicación se definen tres diferentes tipos de topologías en el estándar 802.15.4 como se observa en la Figura 2.4.

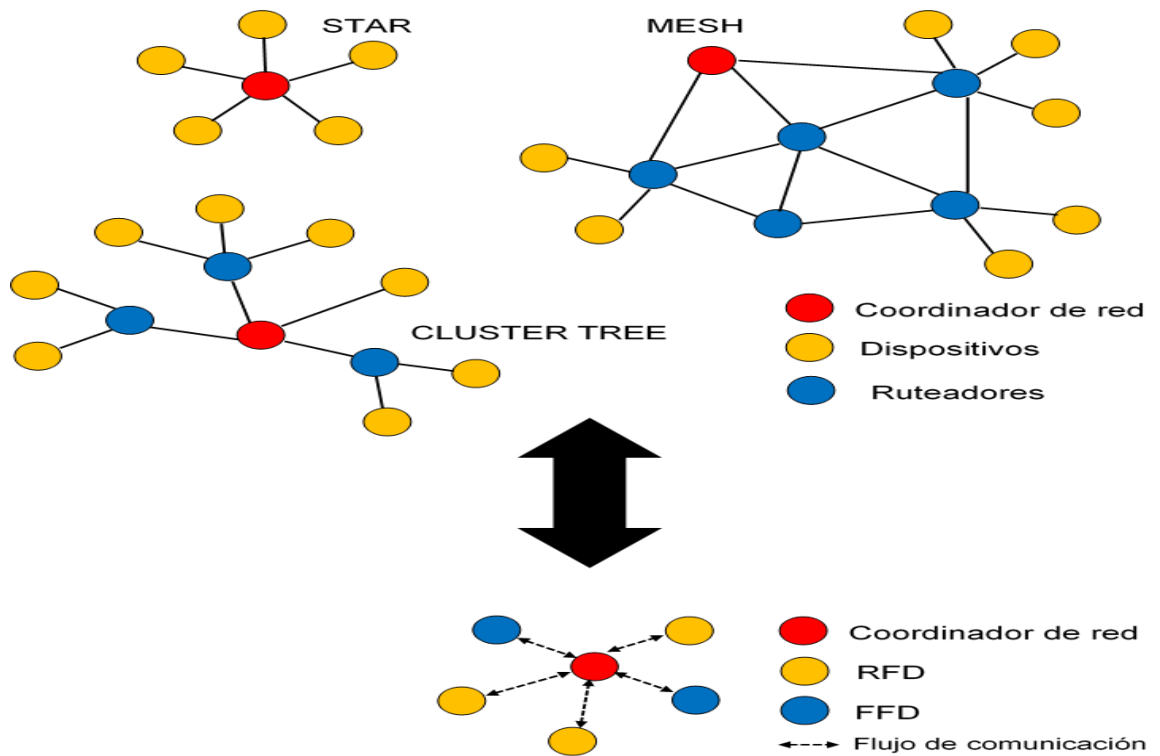


Figura 2.4. Topologías en IEEE 802.15.4 con los nodos en función.

Como se puede apreciar en la Figura 2.4 cada topología define ciertos elementos para su comunicación; los nodos finales se conectan a un solo nodo central FFD (Full Function Device) que representa al único Coordinador de la red PAN y define un identificador para esta red. Los nodos finales RFD (Reduced Function Device) tienen capacidades limitadas.

## 2.4 Tipos de VANET

En la Figura 2.5 se muestra la arquitectura VANET para la comunicación entre vehículos y equipos de carretera que pueden clasificarse ampliamente en 3 tipos: Vehículo a Vehículo (V2V), Vehículo a Infraestructura (V2I) e Híbrida.

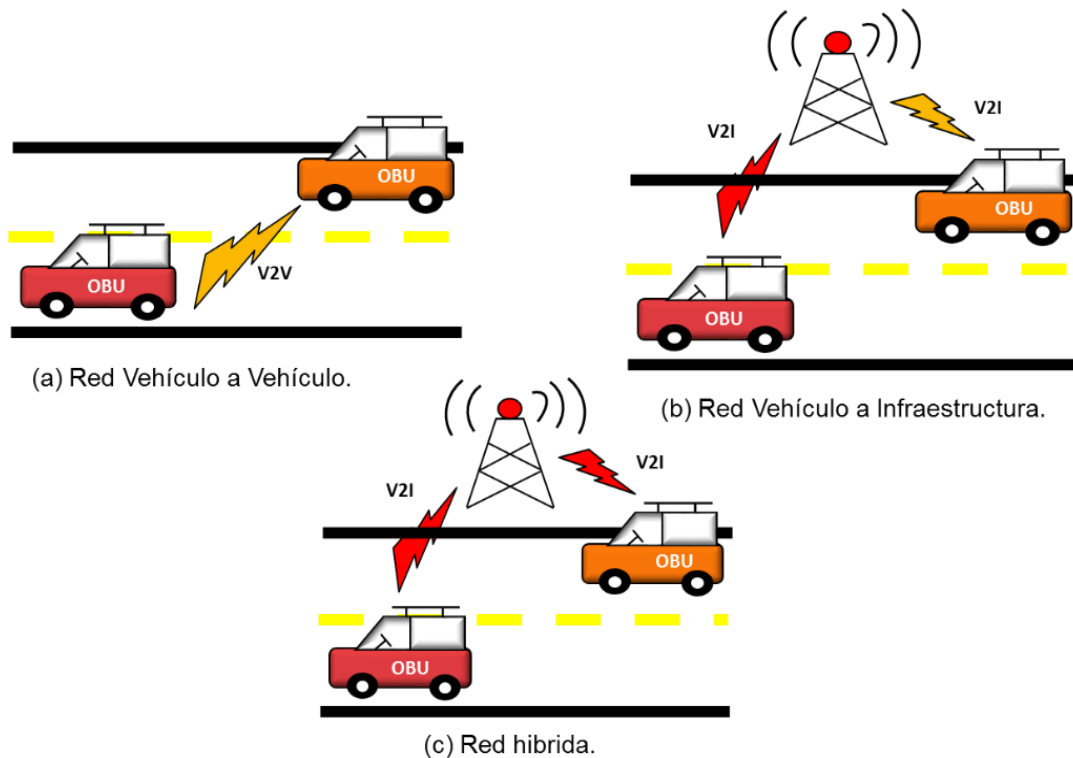


Figura 2.5. Arquitecturas de una VANET.

Dichas arquitecturas son descritas en la siguiente Tabla II.

Tabla II. Descripción de arquitecturas de una VANET.

Tipo de arquitectura	Descripción
<b>Vehículo a Vehículo (V2V)</b>	Existe comunicación directa entre vehículos sin depender de una infraestructura. Son utilizados principalmente en aplicaciones de seguridad [1].
<b>Vehículo a Infraestructura (V2I)</b>	Utilizada principalmente para aplicaciones de recopilación de información y datos para comunicarse con la infraestructura de camino [1].
<b>Híbrida</b>	Según la distancia en la que se encuentra el vehículo, puede comunicarse entre un segundo vehículo y la infraestructura de camino con un salto único o salto múltiple, según sean las necesidades [1].

## 2.5 Infraestructura de una VANET

La red vehicular está compuesta principalmente de tres componentes: (i) Unidad a bordo OBU (On-Board Unit), donde cada vehículo está embebido con una OBU, (ii) Unidad lateral del camino RSU (Road Side Unit), donde se despliega a un lado del camino para que cada vehículo se comunique con la RSU dentro del rango de comunicación usando una OBU. A continuación, se detallan estos componentes.

De acuerdo con la Figura 2.6 la VANET debe ser estructurada como una red Ad-Hoc por lo que no necesita de un dispositivo para el enrutamiento de dispositivos, los nodos se pueden comunicar entre ellos. Los nodos de una red VANET son:

- Unidades OBU: Son las unidades que se encuentran en el vehículo, son utilizadas para la comunicación entre vehículos (V2I) o con una unidad de camino (RSU) en comunicación V2I.
- Unidades RSU: Las unidades de camino, son las encargadas de recibir y distribuir un mensaje entre las unidades a bordo (OBU).

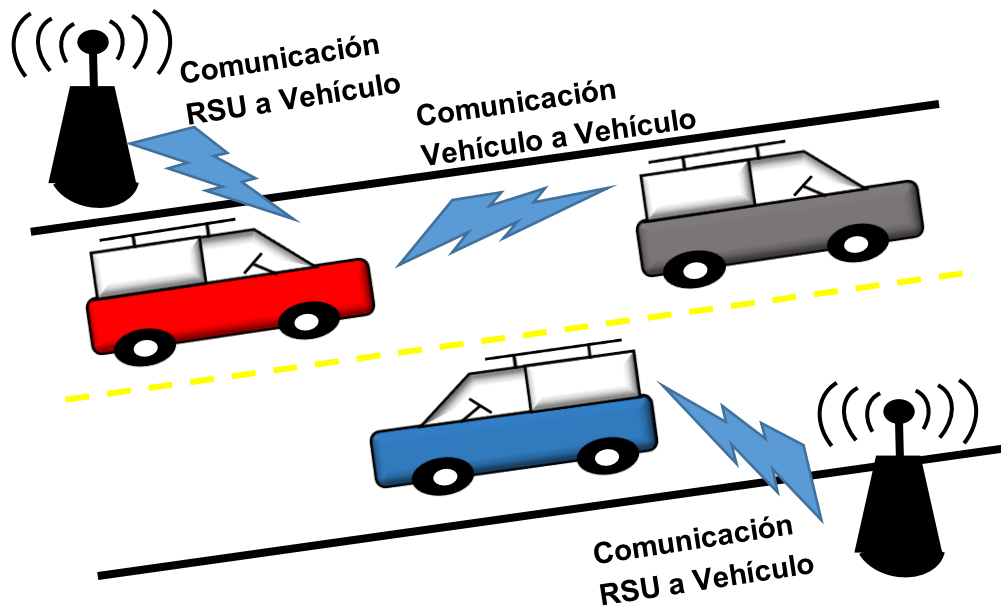


Figura 2.6. VANET V2I básica.

Con los nodos antes mencionados es posible realizar distintos tipos de comunicaciones como las híbridas, en la que todos los dispositivos se comuniquen entre sí, así como también redes específicas entre vehículos, unidades de camino, etc. Lo que llevaría entonces al estudio de las clasificaciones de las VANET.

## 2.6 Conclusiones del capítulo 2

Las redes VANET cuentan con papel importante en el desarrollo de las ciudades inteligentes puesto que con ella existe comunicación entre vehículos y automovilistas, entregando así seguridad en el camino y una disminución en el congestionamiento vehicular. Sin embargo, al trabajar con estas redes se debe de considerar el hecho de que toda red móvil es susceptible a distintos factores, la saturación en las bandas de transmisión, la tasa de transmisión en altas velocidades, por mencionar algunos ejemplos. La anterior problemática es resuelta con la creación de nuevos protocolos que permitan satisfacer las necesidades antes descritas, así como también la mejora de los estándares actualmente usados con el fin de aprovechar la infraestructura actual.

Este trabajo se limita a trabajar con el estándar IEEE 802.15.4 para la implementación de la red V2I, la principal motivación es debido a que es un protocolo, comercialmente hablando, bastante utilizado en sistemas embebidos.

# Capítulo 3. Arquitectura del sistema

## 3.1 Introducción

En este capítulo se presentará la arquitectura del sistema para el análisis y la implementación de la red móvil de este proyecto de tesis. Inicialmente, se considera el modelo del protocolo utilizado para la comunicación entre los vehículos y así mostrar la implementación de la red. Además, se considera la función que tiene cada módulo dentro de la red para establecer la comunicación en la VANET.

## 3.2 Transmisión con el estándar IEEE 802.15.4 para la red vehicular

En este trabajo de tesis se planteó como uno de los objetivos específicos el “Estudiar las características del estándar IEEE 802.15.4 para el envío de mensajes en la red vehicular”, el cual fue abordado en el capítulo 2 sección 3, por lo que corresponde en este apartado determinar el otro objetivo específico que es el “Diseñar e implementar una red inalámbrica VANET V2I con dos vehículos autónomas no tripulados en movimiento y un nodo estático que representa al Coordinador de la red IEEE 802.15.4”.

En la Figura 3.1 se muestran las capas del estándar IEEE 802.15.4 utilizadas para la comunicación entre los nodos, por lo que en la figura se puede apreciar que se definen los nombres específicos para implementar una red de este tipo, como son los nodos finales y el Coordinador de la red. Además, se identifica la comunicación con el servidor de la empresa Particle y el modelo TCP/IP que le corresponde a la transmisión por Internet por medio del estándar WiFi.

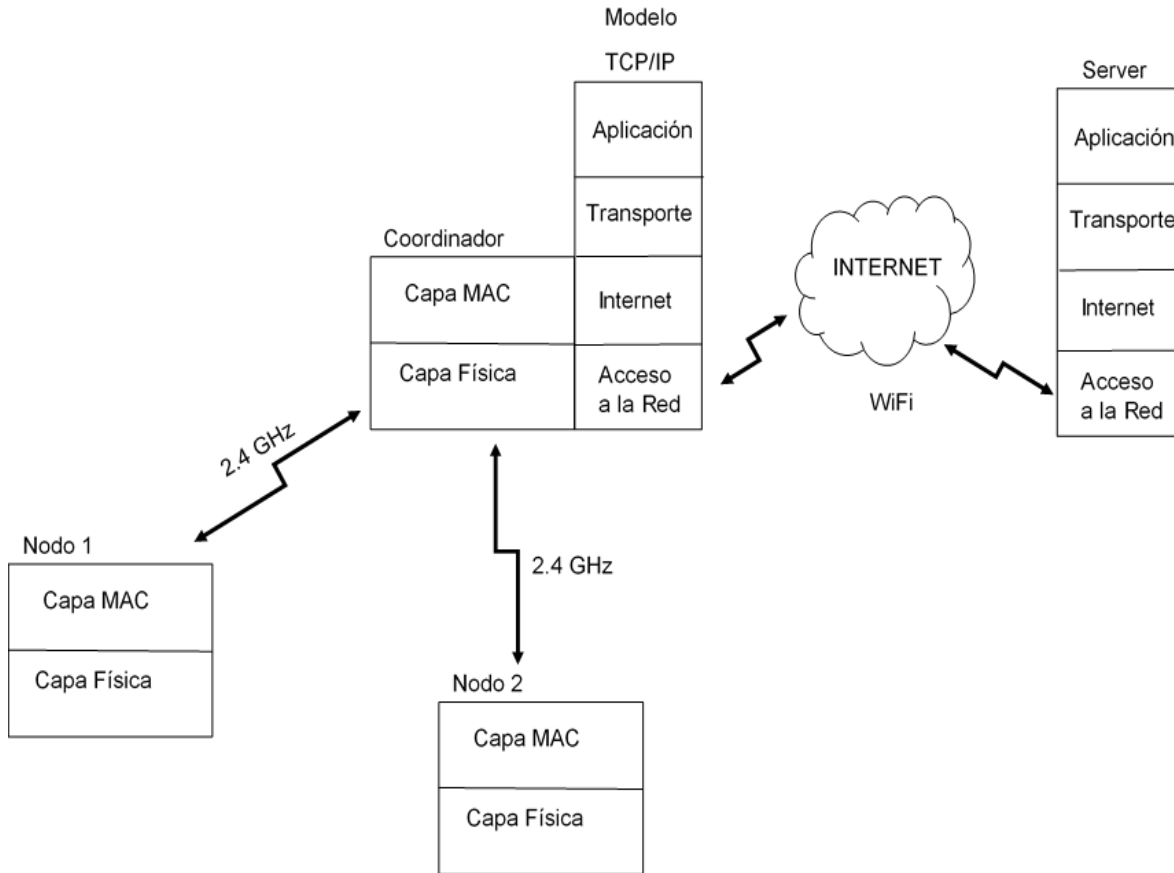


Figura 3.1. Trayectoria de datos en la red vehicular.

En la Figura 3.1 se observa que la implementación del prototipo de red está conformada por dos partes, siendo la primera la WSN en donde se determina si hay algún accidente y, la segunda red es la comunicación por parte del Coordinador hacia el servidor de Particle para informar sobre el estado de los nodos en la red. Los datos que envían los nodos finales hacia el Coordinador son llevados a cabo por medio de la frecuencia de 2.4 GHz. Es importante señalar que cerca del Coordinador es donde se encuentra una computadora que tiene conectado el sniffer de paquetes para realizar el análisis de los paquetes que se transmiten en la red.

En esta misma imagen se aprecia que para el estudio de este proyecto de tesis sólo se enfocará a las capas PHY y MAC del estándar IEEE 802.15.4, revisado en el capítulo 2 sección 3, en donde se observa la dirección física de cada uno de los módulos pasando a través de la capa PHY y saliendo por el medio físico. Es en el módulo correspondiente al Coordinador de la red, cuando se establecen dos

modelos de red: IEEE 802.15.4 para recibir y transferir los datos de y hacia un dispositivo final, y el TCP/IP basado en WiFi para transferir datos al servidor de Particle.

### 3.3 Esquema de implementación

A partir de la Figura 3.1, se desprende el esquema de implementación que se llevó a cabo, el cual se muestra en la Figura 3.2.

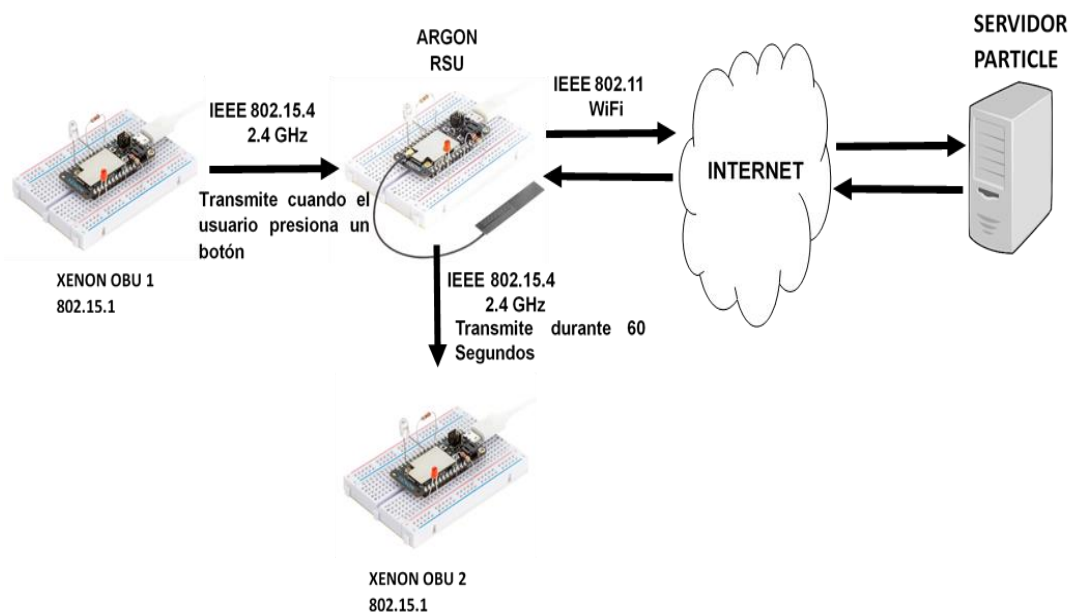


Figura 3.2. Arquitectura de la red.

En la Figura 3.2 se presenta la forma en cómo se interconectan los módulos en la red para el desarrollo de este proyecto de tesis. Los tres módulos se encuentran distribuidos de la siguiente manera; dos módulos Xenon Kit Particle estarán colocados en los vehículos autónomos no tripulados y un módulo estático Argon Kit Particle que realizará la comunicación con el servidor de Particle.

Como se comentó en el capítulo 2 sección 5 con respecto a los elementos y la forma de llevar a cabo la comunicación en la red vehicular, la RSU recolecta y envía los mensajes de aviso durante el funcionamiento de la red V2I, el servidor

Particle, recibirá la información enviada por la RSU para autenticar y registrar los vehículos. En el servidor es posible observar el momento de conexión y desconexión de los vehículos. Una vez que la RSU ha recolectado, en caso de existir, los mensajes de aviso son reenviados durante un tiempo al resto de los vehículos que ingresen a la zona de cobertura de la RSU en cuestión, los conductores de dichos vehículos podrán observar que existe un percance dentro de esta zona ayudados por indicadores LED que se encontrarán instalados dentro de los vehículos. La identificación de los colores de los LED es: blanco si el camino está libre de accidentes y rojo si ha ocurrido un percance dentro de esa zona.

Los vehículos autónomos no tripulados estarán configurados con diferentes velocidades con el fin de analizar la transmisión mediante el sniffer de paquetes.

### 3.4 Configuración y hardware de la red

En este apartado se describen las características principales de los módulos empleados para la implementación de la red. A continuación se detalla su operación de cada uno.

Para los vehículos se utilizaron dos “Alphabot” como se muestra en la Figura 3.3. AlphaBot es una plataforma de desarrollo robótica compatible con Raspberry Pi y Arduino [22].



Figura 3.3. Alphabot [22].

En dicho robot se montaron los módulos transmisores de datos, encargados de comunicar al vehículo con la infraestructura, para dichos módulos se utiliza la tarjeta de desarrollo de Particle, Xenon como se muestra en la Figura 3.4. El Xenon es un kit de desarrollo de bajo costo que puede actuar como punto final o repetidor dentro de la red [23].

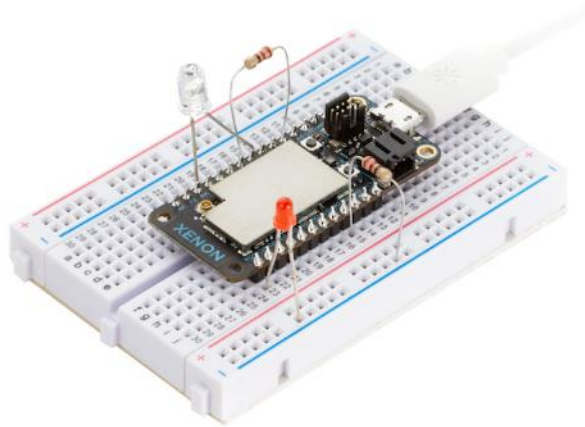


Figura 3.4. Tarjeta Xenon, que será la transmisora/receptora de datos de los vehículos a la infraestructura [23].

Para establecer un nodo central que sea el encargado de distribuir la información en el área de cobertura, se define entonces a la infraestructura mediante la tarjeta de desarrollo Particle Argon mostrada en la Figura 3.5, que se encarga de transmitir el mensaje recibido de un vehículo a otros vehículos. Particle Argon es un potente kit de desarrollo de Wi-Fi que puede usar como dispositivo Wi-Fi independiente o puerta de enlace, repetidor o punto final habilitado para Wi-Fi para redes [24].

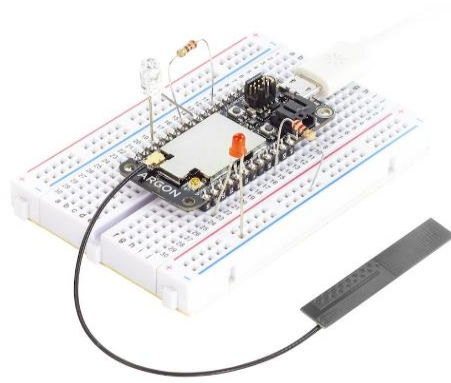


Figura 3.5. Tarjeta Particle Argon [24].

El Xenón y el Argón tienen la función de transceiver, es decir, es capaz de transmitir y recibir según sea el caso. De acuerdo con estas funciones, la red se determina por las siguientes etapas, las cuales quedan resumidas en la Figura 3.6.

1. El vehículo 1 (V1) detecta un percance y envía a la infraestructura el mensaje de alerta, el vehículo se aleja.
2. El servidor almacena y retiene la información o mensaje de alerta, el vehículo 2 (V2) entra en el radio de cobertura de dicha infraestructura por lo que la infraestructura envía el mensaje de alerta al vehículo 2.
3. Pasado un tiempo, la infraestructura se reinicia y queda en el modo de espera hasta que un nuevo dato es recibido.

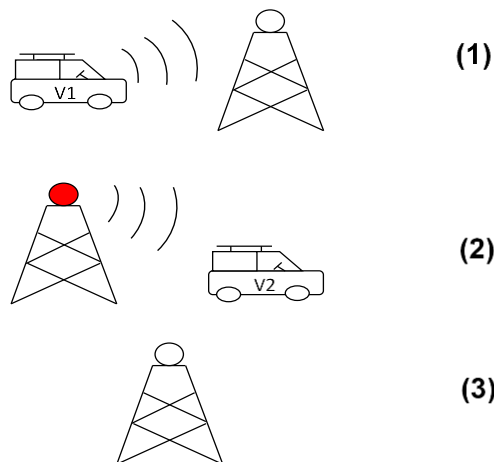


Figura 3.6. Etapas de conexión de la red vehículo-infraestructura.

Con lo descrito anteriormente, se procede a mostrar los diagramas de flujo utilizados para la programación de los módulos.

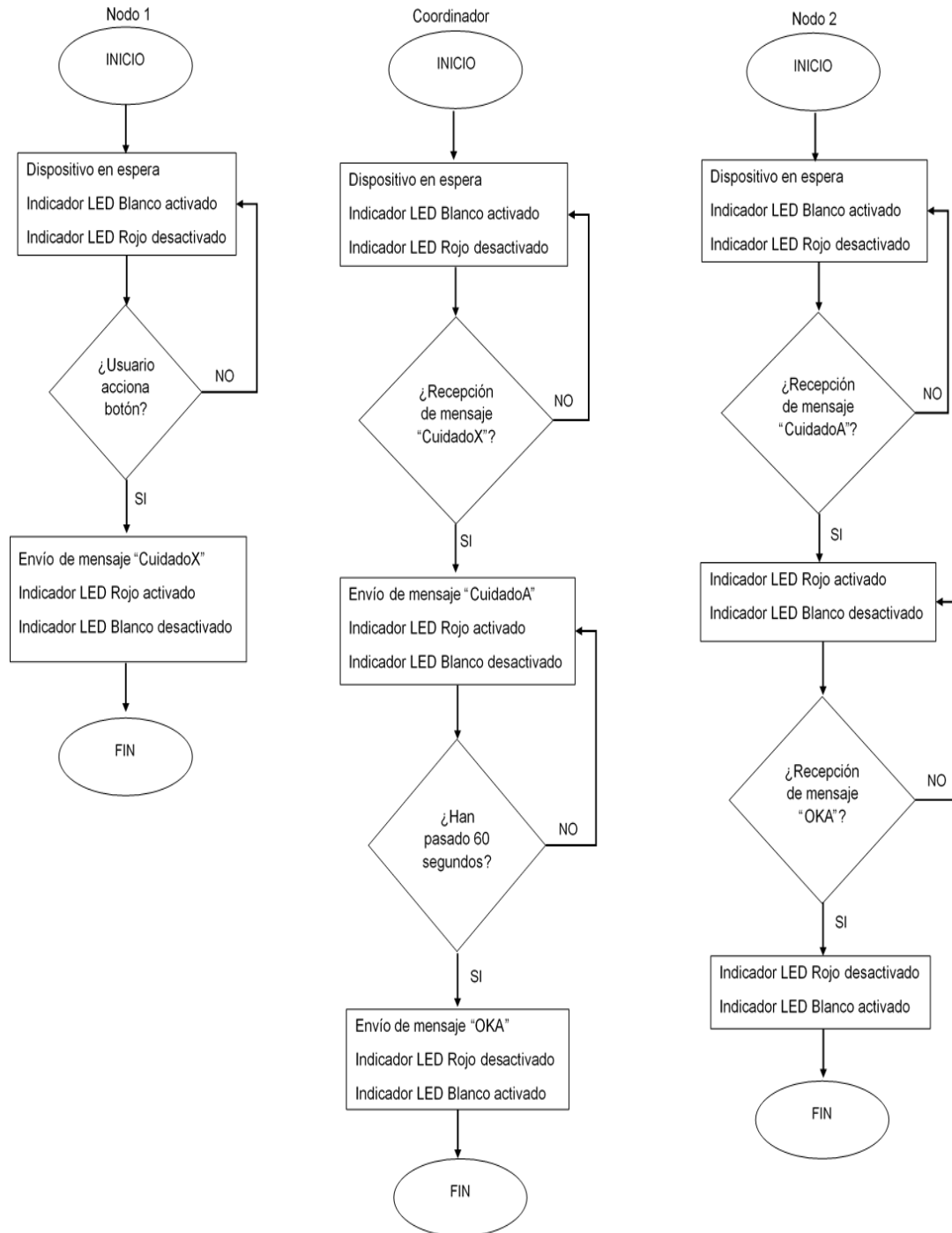


Figura 3.7. Diagrama de flujo de la infraestructura.

De acuerdo con los diagrama de infraestructura en la figura 3.7, el nodo 1 será el encargado de iniciar la red, cuando el dispositivo se encuentra en estado de espera se mantendrá encendido un indicador LED blanco, una vez que se detecta una alerta por el usuario, accionara un botón que enviara el mensaje “CuidadoX” al coordinador, que será encargado de la distribución del mismo al resto de nodos, a su vez en el nodo 1 se desactivara el indicador LED blanco y se encenderá un indicador LED rojo.

El diagrama del dispositivo Argón (Coordinador) se encuentra en espera, indicado por un LED blanco, una vez que recibe el dato de un vehículo encriptado en el mensaje “CuidadoX”, comienza a emitir el mensaje “CuidadoA” por un minuto, a su vez se apaga el LED blanco y se enciende un LED rojo, una vez que termina ese tiempo, envía el mensaje “OKA” el cual reinicia lo módulos de los vehículos a la vez que reinicia el sistema de la infraestructura y enciende nuevamente el LED blanco.

El diagrama del nodo 2 indica que el dispositivo se encuentra en el estado de espera, indicado por un LED blanco, una vez que se presiona un botón que se encuentra ubicado en el circuito del nodo 1, se cambia al estado de alerta en donde se apaga el LED blanco y se enciende un LED rojo y se mantendrá en ese estado hasta que reciba el mensaje “OKA” lo cual le permitirá al sistema restablecerse, encendiendo nuevamente el LED blanco.

Para realizar la caracterización de velocidades se utilizó un foto sensor que se encuentra en el kit del Alphanot, el cual se muestra en la Figura 3.8



Figura 3.8. Foto sensor utilizado para medir la velocidad [25].

Adicional a lo anterior, se utiliza un disco que contiene 20 ranuras el cual se coloca en el motor reductor.



Figura 3.9. Disco con ranuras para medir el número de pulsos [25].

Después de realizar pruebas, se analizó que el disco cuenta con una relación uno a uno entre el número de ranuras y el perímetro de la rueda, es decir, cada vez que el foto sensor detecta 20 pulsos por dichas ranuras la rueda del Alhabot ha completado un giro completo.

Para calcular la velocidad en el Alhabot, se procede a utilizar la ecuación 1.

$$velocidad = \frac{distancia}{tiempo} \quad (1)$$

El tiempo se define en un segundo en todas las pruebas, sin embargo, la distancia que recorre la rueda cambiará según el voltaje inducido. Cuando se induce el mayor voltaje posible, se tiene la mayor velocidad posible en el robot, esto es una cantidad de 85 pulsos definida mediante la variable  $N_p$ .

Para calcular la distancia recorrida basada en tiempo y voltaje, se obtiene el perímetro de la rueda mediante la ecuación 2.

$$Perímetro = 2\pi(\text{radio}) = (\text{Diámetro})\pi \quad (2)$$

Teniendo un diámetro en la rueda de 6.7 cm se obtiene un perímetro de 21.0486 cm, por lo que la distancia recorrida entonces estará definida por la ecuación 3, dando una distancia de 89.45 cm.

$$distancia = \frac{Np * perimetro}{20} \quad (3)$$

De esta manera se determina que la velocidad máxima a la que el Alhabot puede trabajar es de 89.45 cm/s. Siguiendo con el mismo procedimiento se determinó que la velocidad mínima es de 45.25 cm/s con 43 pulsos en las ruedas.

Es importante mencionar que las pruebas realizadas para determinar las velocidades fueron en condiciones de terreno plano, seco y liso.

### 3.5 Estructura de la trama IEEE 802.15.4 en la VANET

Para realizar el análisis de la trama en el estándar IEEE 802.15.4 en el modo experimental en términos del retardo en la transmisión, se hizo referencia a un analizador de paquetes de red, mejor conocido como sniffer. En la Figura 3.10 se muestra el sniffer que corresponde al de la empresa Texas Instruments es un Dongle USB CC2531 que sirve para capturar las tramas de la capa MAC que se intercambian dentro de la red VANET propuesta

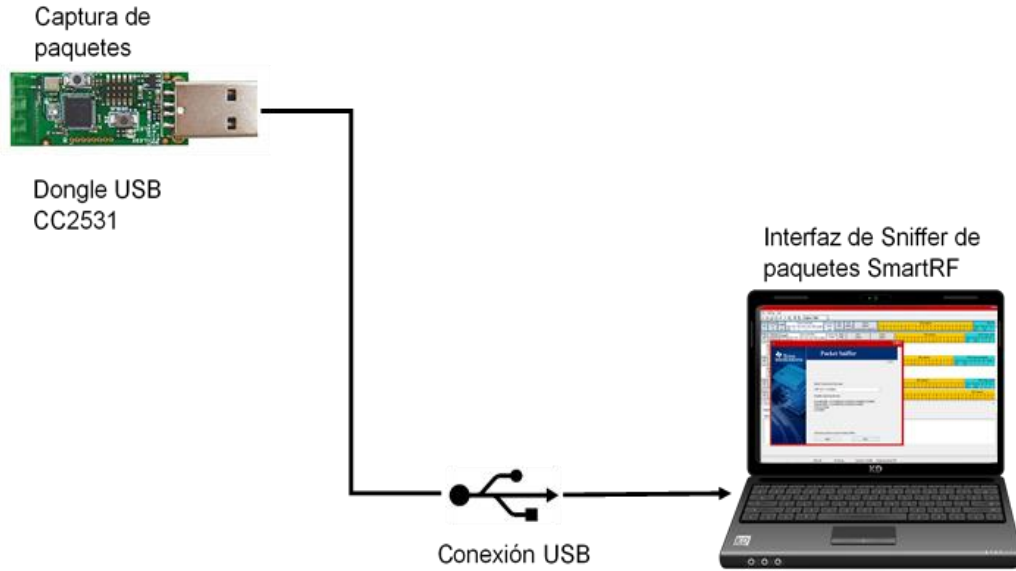


Figura 3.10. Estructura de lectura para la recepción y lectura de paquetes.

A continuación, se describirán de forma general los campos importantes que se tomaron en cuenta para el análisis de este paquete.

El Sniffer de paquetes SmartRF es un software de aplicación para la PC utilizada para desplegar y almacenar paquetes RF capturados en el momento en que se escucha un nodo RF de Hardware. El Sniffer de paquetes filtra y decodifica paquetes para desplegarlos de una manera conveniente, con opciones para filtrado y almacenaje en un formato digital. En la Figura 3.11 se presenta el formato que tiene el paquete a analizar, donde el número de bytes se muestra en cada campo.

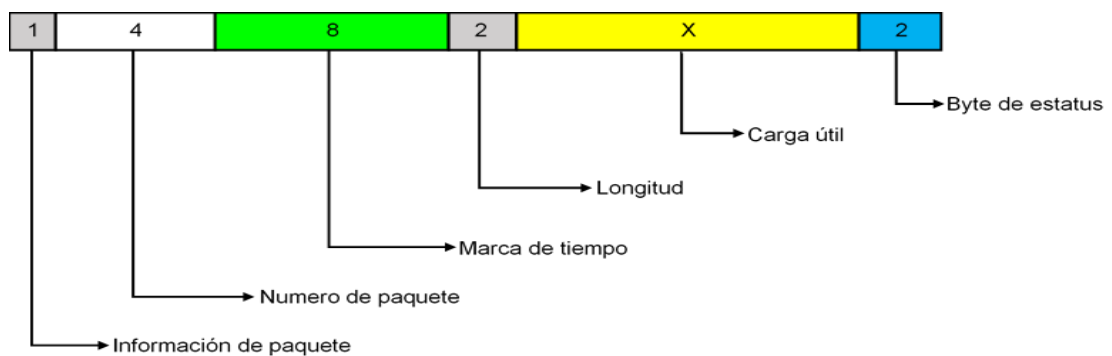


Figura 3.11. Paquete de datos.

En la Tabla III se muestra a manera de resumen lo que contiene cada campo.

Tabla III. Definición de los campos del paquete.

Campo	Contenido
<b>Información del paquete</b>	Información utilizada por el sniffer para leer los datos correctamente.
<b>Marca de tiempo</b>	Tiene 16 valores hexadecimales que corresponden a los 64 bit del valor del contador. El primer paquete se utilizará con un valor de offset para todos los paquetes. Esto significa que el paquete número 1 se muestra en el sniffer con el tiempo = 0.
<b>Longitud</b>	Incluirá la carga útil o payload y los dos bytes de estado.
<b>Carga útil</b>	Esta carga útil dependerá del dispositivo RF utilizado para transmitir. De acuerdo con el estándar IEEE 802.15.4, la longitud que se presenta y se incluye en el paquete contendrá la longitud de la carga útil y los dos bytes finales del Campo de Secuencia de Verificación de Trama FCS, que es en este campo donde se verifica si la trama llegó correcta o no por medio del algoritmo de Código de Redundancia Cíclica CRC.
<b>Estado de los bytes</b>	Estos bytes se generan por el dispositivo RF utilizado como dispositivo de captura.  Byte 1: RSSI  Byte 2: Bit 7 indica si el CRC es Ok o no.  Bit 0-6 depende del dispositivo RF y de la configuración de este.

Antes de realizar las pruebas directamente con la red VANET se realizó una transferencia de datos entre los dispositivos para describir a detalle el significado de cada campo del paquete que se capturó en la transmisión y así poder analizar los resultados.

En la Figura 3.12 se presenta la imagen capturada en el software de una secuencia de paquetes que se transmiten entre los módulos en estado de reposo.

Tabla IV. Descripción de los campos en el intercambio de paquetes con los módulos en reposo.

No. Campo	Descripción
1	Tiempo en el que se recibe la trama, el signo + indica lo que se le va a agregar al dato del tiempo anterior.
2	Type es el tipo de información que se transmite. En este caso se usa el DATA para indicar que es el mensaje que se está transmitiendo.
3	Este valor corresponde al número de secuencia de cada conversación partiendo de la dirección de origen del dispositivo correspondiente.
4	Este número es con el que se identifica la Red de Área Personal PAN, el cual será el mismo durante toda la práctica.
5	La dirección destino indicará a quién va dirigida la información.
6	La dirección origen indicará quién origina dicha información.
7	Ack. req. Indica si es necesario que se envíe un reconocimiento, es decir si está puesto a 1 se mandará de lo contrario no habrá envío del Ack.
8	Type en este caso indica el ACK como reconocimiento (acknowledge) para darle a conocer al otro dispositivo que la información llegó correcta.
9	El valor RSSI. En el tráiler de la trama se define si se quiere detectar. Cuando el valor se detecta en la trama se indica el valor en dBm para identificar que tan cerca o lejos se encuentra el dispositivo del sniffer.
10	FCS. El campo de secuencia de verificación de trama indica si la trama llegó correcta que en este caso lo hace por medio de un OK.

P.nbr.	Time (us)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. Address	Source Address	MAC payload	RSSI (dbm)	FCS
RX	+4204552	139	Type: DATA Type: Sec Pnd Ack.req PAN_comp 0 0 0 0 1	0x4543	0xFFFF	0x1E90AE800DBEFD1	7F 3B 01 F0 4D 4C 4D 4C 02 1E 00 15 2A 3B 00 00 00 00 00 01 52 12 6C 0E 57 1E 47 C6 26 C6 32 79 2A F2 E6 73 58 B7 E3 B4 E1 E1 CC 09 05 C9 6C 08 E7 8E 23	-54	OK
P.nbr.	Time (us)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. Address	Source Address	MAC payload	RSSI (dbm)	FCS
RX	+10644350	61	Type: DATA Type: Sec Pnd Ack.req PAN_comp 0 0 0 0 1	0x4543	0xFFFF	0x42904B478D668A7	7F 3B 02 F0 4D 4C 4C 45 A3 00 15 28 33 00 00 00 00 00 01 73 D7 BC E6 24 E2 42 C2 96 E9 82 B2 CD F4 14 08 88 7B 0C 55 73 FE 97	-39	OK
P.nbr.	Time (us)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. Address	Source Address	MAC payload	RSSI (dbm)	FCS
RX	+2118354	63	Type: DATA Type: Sec Pnd Ack.req PAN_comp 0 0 0 0 1	0x4543	0xFFFF	0x42904B478D668A7	7F 3B 02 F0 4D 4C 4C 4C A1 ED 00 15 29 33 00 00 00 00 01 55 05 CE 2A AA 51 ED 50 37 0A 4A 99 88 5A 81 02 EC A6 13 66 A5 56 08 39 E2	-39	OK
P.nbr.	Time (us)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. Address	Source Address	MAC payload	RSSI (dbm)	FCS
RX	+496262	113	Type: DATA Type: Sec Pnd Ack.req PAN_comp 0 0 1 1 1	0x4543	0xFFFF	0x1E90AE800DBEFD1	7F 33 F0 4D 4C 4D 4C D1 46 00 15 2B 3B 00 00 00 00 01 73 5A 46 A3 AA 7F CD 04 D6 8D 80 46 4E 89 C2 51 13 4E B6 6D 95 C6 F7 34 A7 42 39 23 0E BC 12 C6 65 E4 84 30 DC 88 5D 2D 77 E9 65 D4 93 86 F1 6F EF 30 F7 DA 73 D1 2D A2 AF C1 90 15 12 E1 C8 64 95 9A EA F0 7A B5	-45	OK
P.nbr.	Time (us)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. Address	Source Address	MAC payload	RSSI (dbm)	FCS
RX	+4001	5	Type: ACK Type: Sec Pnd Ack.req PAN_comp 0 0 0 0 0	0x4543	0xFFFF	0x1E90AE800DBEFD1		-39	OK

Figura 3.12. Captura de transmisión de paquetes de los módulos en reposo.

De acuerdo con lo descrito anteriormente, se observa que a partir del punto 1 se pueden calcular los tiempos de duración de la transmisión. Además, considerando el punto 9 se puede deducir si se encontraba cerca o lejos el módulo debido a la potencia en dBm que envía el paquete. Por lo que a continuación se explica el parámetro RSSI.

### 3.5.1 Análisis del RSSI

Se define como sensibilidad al valor de potencia mínimo en la que el receptor presenta una buena calidad de señal a la salida, generalmente es el ruido, el que limita este valor. Sin embargo, es posible, demodular adecuadamente valores de potencia recibidos entre el picovatio y el femtovatio, en torno a unos -85 a -120 dBm [26]. Se puede definir en términos de potencia (dBm) y voltaje. En el caso de los módulos que se utilizaran para la implementación de la red se indica en el datasheet que tanto el módulo Argón como el módulo Xenón cuentan con una potencia de transmisión programable de +8 dBm hasta -20 dBm y dicha programación se realiza en pasos de 4 dB [27,28].

Las siglas RSSI significan Received Signal Strength Indicator (Indicador de intensidad de señal recibida). Es la potencia medida de una señal de radio recibida. Se implementa y se usa ampliamente en los estándares 802.11. La potencia recibida se puede calcular a partir de RSSI [29]. El valor es medido en decibelios que van desde 0 hasta -120. Cuanto más cercano sea el valor a cero, más fuerte será la señal. Con esto, el punto común para los nodos vecinos es entre -55 (menos 55) y -65 (menos 65) [30]. Observando la figura 3.12 se puede ver en la trama la existencia de un parámetro indicado con el número 9 llamado RSSI, cuando el primer módulo entra en la red, en la primera línea, se detecta una conexión a partir de la dirección con iniciales 0x1E90, cuyo parámetro RSSI es de -39 dBm indicando así que la distancia entre el sniffer y el primer módulo no representara problemas en la comunicación entre los dispositivos, en la siguiente línea se detecta a un segundo dispositivo ingresando a la red cuyas iniciales de su dirección son 0x4629,

se destaca el parámetro RSSI de -54 dBm indicando así que en el caso de existir variaciones en la comunicación podrían ser debido a la distancia en la que se encuentra el segundo módulo con respecto a la posición del sniffer. Como se muestra en la figura 3.13.

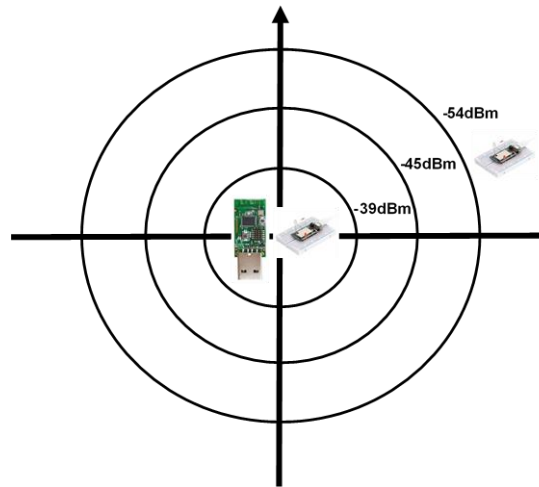


Figura 3.13. Representación del parámetro RSSI a partir de la comunicación del sniffer y dos módulo en reposo.

Una vez que empieza la comunicación entre ambos módulos, línea 4 de la trama, el sniffer detecta un parámetro de -45 dBm en la comunicación de ambos módulos, indicando así, una buena comunicación entre ambos dispositivos pues se encuentran dentro de una distancia favorable para la comunicación entre ambos.

## 3.6 Conclusiones

En el presente capítulo se analizaron los elementos necesarios para el análisis e implementación de una VANET V2I, tomando en cuenta la configuración de nodos, la arquitectura de la red y la comunicación entre los nodos.

Este trabajo se basará principalmente en el análisis de la trama de la red, por medio de la cual, se observará el desempeño de la red a partir de los retardos de conexión. Además se realizarán pruebas en distintas velocidades con el fin de comprobar la fidelidad y fiabilidad de la red.

# Capítulo 4. Resultados finales

## 4.1 Introducción

En este capítulo se presentan las pruebas preliminares que se realizaron con el fin de analizar la comunicación entre nodos y obtener la información relevante de la red. Posteriormente, se muestran los resultados finales basados en la velocidad del vehículo para determinar de qué manera afecta el factor de movimiento en la comunicación o el tiempo de envío de datos. Todo esto analizando las tramas capturadas a través del sniffer de red.

## 4.2 Datos de las pruebas preliminares

La estructura de la red requiere establecer una comunicación entre vehículos con la finalidad de transmitir un mensaje de aviso entre ellos a través de un transmisor que se encargue de distribuir dicho mensaje a todos los vehículos que se encuentren dentro de su cobertura. Para ello, primeramente, se inició la configuración de la red tipo estrella cuyo movimiento fue discretizado, con el fin de identificar las direcciones físicas y la forma de lectura de la trama.

En la Tabla V se muestran las direcciones físicas de los módulos, las cuales sirven para realizar el seguimiento de la conversación en la red. De igual forma se detectó que el coordinador de la red, en este caso el módulo Argón configurado en modo infraestructura define el nombre de la red como 0X4543.

Tabla V. Direcciones físicas de los módulos que conforman la red VANET.

Módulo	Dirección física
Argón	1E90AE800DBEFD1
Xenón 1	462904B478D868A7
Xenón2	A2F70FD968F4D93C

### 4.3 VANET en modo Infraestructura y análisis de las tramas

De acuerdo con la configuración de los módulos explicada en el Capítulo 3 sección 4, se procede a la implementación de la red vehicular en modo infraestructura. A continuación, se presenta en la Figura 4.1 el montaje de las tarjetas Xenón sobre los vehículos, los cuales tienen el objetivo de transmitir y recibir el mensaje de acuerdo con el planteamiento de este trabajo. Para una mejor explicación del funcionamiento en la red se definen como V1 y V2.

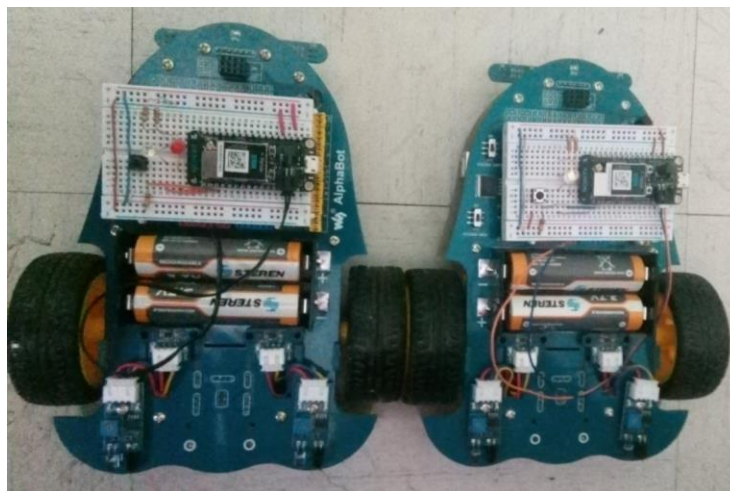


Figura 4.1. Vehículos V1 y V2 con tarjeta Xenón para transmitir y recibir el mensaje.

De esta manera se explica a continuación, la forma en cómo operaron las tarjetas para indicar cuando se detectaba un supuesto incidente vial y así comprobar que el algoritmo cumplía con el objetivo. Paralelamente a esto, se presentarán las tramas representativas para cada paso, cabe mencionar que para una mejor explicación se recortará la trama sólo con los campos necesarios.

En la Figura 4.2 se muestra la tarjeta Argón programada para la función de infraestructura de la red, en donde se observa que el LED blanco indica el modo en espera, esto quiere decir que una vez que la tarjeta se encuentra en funcionamiento empieza a emitir mensajes de tipo broadcast para monitorear si alguien se encuentra en su cobertura y así aceptar al nodo en la red, esto se observa en la Figura 4.3.

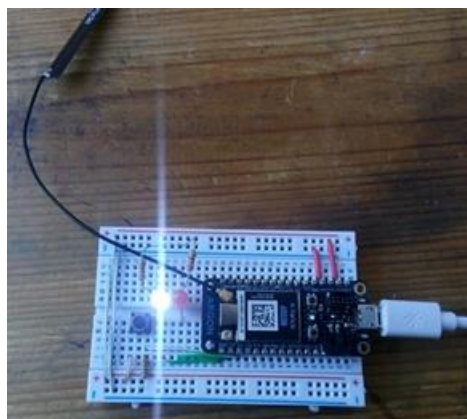


Figura 4.2. Módulo de la infraestructura en modo de espera de dato denotado por la tarjeta Argón.

Frame control field					Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address
Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr				
DATA	0	0	0	1	0xA6	0x4543	0xFFFF	0x1E90AE800DBEFDf1

Figura 4.3. Modo en espera: trama tipo broadcast emitida por la infraestructura.

En la Figura 4.3 se destaca que la trama envía datos, el número de secuencia que le corresponde es el 0xA6, el nombre de la red de área personal PAN es 0x4543, se envía un broadcast definido como 0xFFFF a todos los miembros de la red y el

que lo envía es la dirección 1E90AE800DBEFDF1 correspondiente al módulo Argón.

Cuando el V1 se pone en movimiento e ingresa a la cobertura de la infraestructura, este V1 envía el mensaje de alerta a la infraestructura, el cual se indica a través del encendido del LED rojo como se aprecia en la Figura 4.4. Esto sólo sucede cuando V1 recibe el mensaje por parte de la infraestructura y queda registrado en la red.

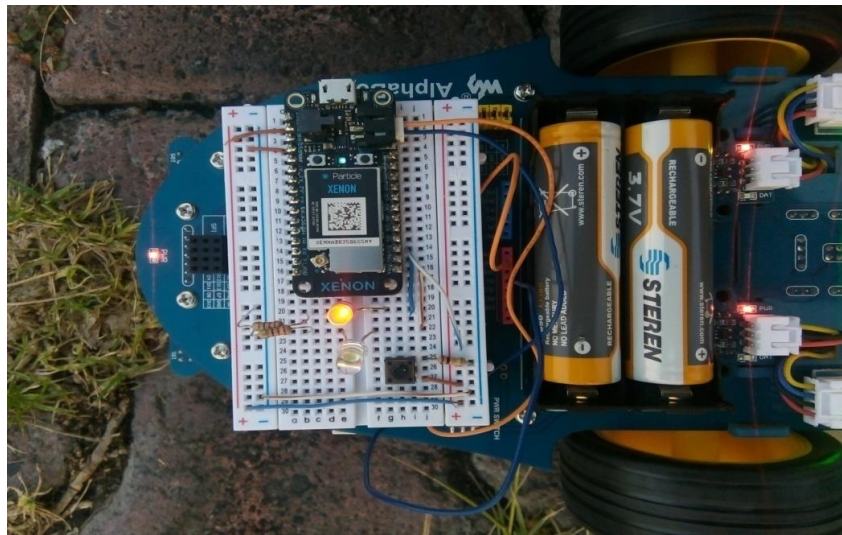


Figura 4.4. Envío de mensaje de alerta por parte de V1.

De esta manera, la infraestructura recibe y almacena el mensaje para comenzar a transmitir ese mismo mensaje para los siguientes vehículos que ingresen a su área de cobertura, mientras que el V1 sale del área de cobertura. Esto queda demostrado con el apagado del LED blanco y el encendido del LED rojo indicando que contiene un mensaje de alerta, esto se observa en la Figura 4.5.

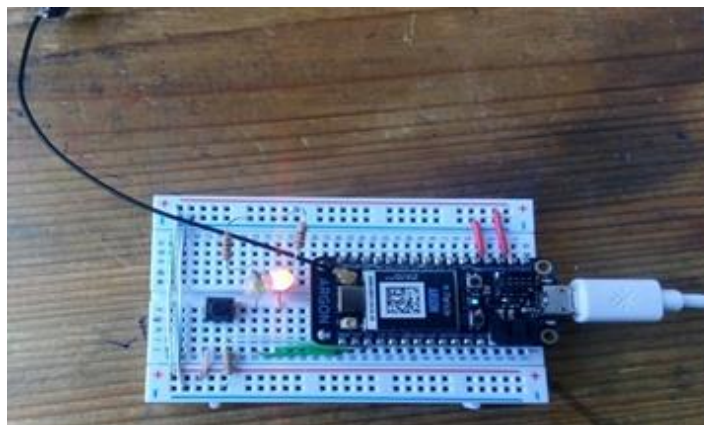


Figura 4.5. Módulo de la infraestructura en modo transmisor de mensaje de alerta por la tarjeta Argón.

En el caso del análisis de las tramas, mostrada en la figura 4.6, se agrega el número de trama: 2, 3, 4 y 5 con el fin de que se aprecie la secuencia en esta comunicación. La trama 2 corresponde al envío de alerta por parte de V1 con número 0xC7. Con estos números fue como se rastreó la comunicación entre los vehículos y la infraestructura. En la trama 3 que tiene el mismo número de secuencia indica una respuesta o reconocimiento por parte de la infraestructura de que recibió el mensaje. En las tramas 4 y 5 sucede algo parecido por parte de la infraestructura como punto de origen, esto se nota por el número de secuencia 3E.

P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address
RX	+15631		Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr				
2	=15631	61	DATA 0 0 1 1	0xC7	0x4543	0x1E90AE80DBEFD1	0x462904B478D868A7
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field	Sequence number			
RX	+2		Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr				
3	=15633	5	ACK 0 0 0 0	0xC7			
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address
RX	+2		Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr				
4	=15636	87	DATA 0 0 1 1	0x3E	0x4543	0x462904B478D868A7	0x1E90AE80DBEFD1
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field	Sequence number			
RX	+3		Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr				
5	=15640	5	ACK 0 0 0 0	0x3E			

Figura 4.6. Recepción del mensaje de alerta: comunicación entre infraestructura y V1.

El V2 se pone en marcha e ingresa al área de cobertura de la infraestructura, así este último le envía el mensaje de alerta. El V2 recibe el mensaje y el LED rojo notifica esta acción. Esto se muestra en la Figura 4.7.

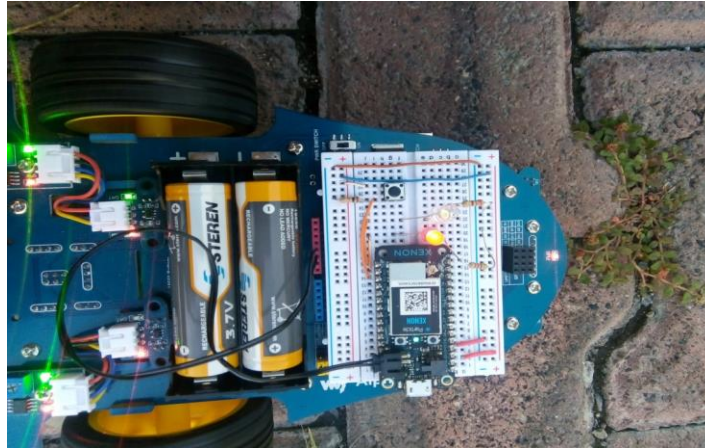


Figura 4.7. Recepción de mensaje de alerta en el V2.

En el análisis de las tramas, mostrada en la Figura 4.8, se observa el ingreso de V2 a la red con la dirección A2F70FD968F4D93C y número de secuencia 0x64, el cual envía el mensaje de alerta a la infraestructura por medio de la trama 1175 y 1176 siendo el ACK. Posteriormente, la infraestructura le responde y solicita el ACK.

P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address
RX	+924		Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr				
1175	=30744	61	DATA 0 0 1 1	0x64	0x4543	0x1E90AE800DBEFDf1	0xA2F70FD968F4D93C
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field	Sequence number			
RX	+2		Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr				
1176	=30746	5	ACK 0 0 0 0	0x64			
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address
RX	+4		Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr				
1177	=30751	87	DATA 0 0 1 1	0x2B	0x4543	0xA2F70FD968F4D93C	0x1E90AE800DBEFDf1
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field	Sequence number			
RX	+3		Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr				
1178	=30754	5	ACK 0 0 0 0	0x2B			

Figura 4.8. Transmisión y recepción del mensaje entre infraestructura y V2.

Una vez realizado estas etapas de comunicación en la red, se espera un tiempo de un minuto para reiniciar a la infraestructura, apagando el LED rojo y encendiendo el LED blanco, como se muestra en la Figura 4.9. De esta manera, se encuentra en espera de un nuevo mensaje de alerta.

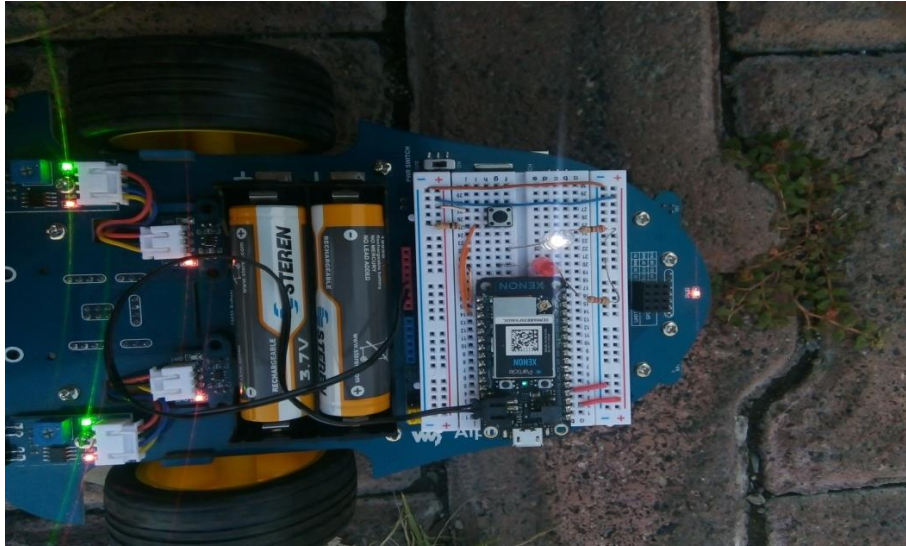


Figura 4.9. El módulo de V2 se reinicia y pasa al modo espera.

De acuerdo con lo explicado anteriormente, se detallaron las etapas de las que se conforma la comunicación de la red para dar y recibir el mensaje de alerta tanto física como en la red. Para el análisis del comportamiento de la red en movimiento, se optó por definir estas etapas de comunicación entre la infraestructura y cada vehículo, el número de mensajes que se envían y el tiempo de duración.

Finalmente, en los resultados se establecieron dos velocidades diferentes: una máxima y una mínima y, para cada una se realizaron tres pruebas llevadas a cabo en el exterior tratando de emular la realidad, con el fin de observar cómo afectaba el ambiente, los obstáculos y la banda 2.4 GHz.

### 4.3.1 Velocidad mínima

A continuación, en la Tabla VI, se presenta la relación de los tiempos con el número de mensajes llevados a cabo por cada etapa de la red.

Tabla VI. Relación de tiempos en cada etapa con la velocidad mínima.

Etapa	Módulos	Núm. de mensajes	Rango en el tiempo	Tiempo en ms
Comunicación 1	Infra/ V1	1180	0 – 30918 ms	30918 ms
Comunicación 2	Infra/ V2	429	30928 -81824 ms	50896 ms

### 4.3.2 Velocidad máxima

A continuación, en la Tabla VII, se presenta la relación de los tiempos con el número de mensajes llevados a cabo por cada etapa de la red.

Tabla VII. Relación de tiempos en cada etapa con la velocidad máxima.

Etapa	Módulos	Núm. de mensajes	Rango en el tiempo	Tiempo en ms
Comunicación 1	Infra/ V1	1229	0 – 24337 ms	24337 ms
Comunicación 2	Infra/ V2	261	25296 -78053 ms	52757 ms

### 4.3.3 Desconexiones de la red

En las pruebas realizadas y analizadas en las secciones 4.3.1 y 4.3.2 se tuvieron algunos paquetes que contenían errores, indicados por el parámetro FCS

denotados por “ERR”. En ambas pruebas se tuvieron un total de cinco errores de conexión. El aspecto de los errores se muestra en la figura 4.10 y la figura 4.11.

P.nbr.	Time (us)	Length	Frame control field				Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	Security control		Frame counter	Key identifier		FCS	
			Type	Sec	Pnd	Ack.req					PAN_compr	Level		Key_id_mode	Key_source		Key_index
RX 1418	+3339 =44068238	107	CMD	1	0	1	1	0xCC	0x4543	0x6000	0x600C	0x05	0x01	0x0002BD3E	-	0x01	ERR

Figura 4.10. Error en la recepción de trama.

P.nbr.	Time (us)	Length	Frame control field				Sequence number	RSSI (dBm)	FCS		
			Type	Sec	Pnd	Ack.req				PAN_compr	
RX 1152	+4957 =14112736	60	CMD	0	1	1	0	0x33	Unknown command	-35	ERR

Figura 4.11. Error en la trama por comando desconocido.

El error mostrado en la figura 4.10 se presentó en ambas pruebas, es debido a que cuando se solicita el envío de reconocimiento (Ack. req) se registra un fallo por ello se presenta el “ERR” en el parámetro FCS. Posteriormente el sistema vuelve a enviar la misma solicitud proveniente de la misma dirección y hacia el mismo receptor obteniendo esta vez una respuesta favorable como se muestra en la figura 4.12. Sin embargo lo anterior propiciaba a gastar más recursos de red.

P.nbr.	Time (us)	Length	Frame control field				Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	Security control		Frame counter	Key identifier		FCS	
			Type	Sec	Pnd	Ack.req					PAN_compr	Level		Key_id_mode	Key_source		Key_index
RX 1419	+7266 =44075504	122	DATA	1	1	1	1	0xCC	0x4543	0x6000	0x600C	0x05	0x01	0x0002BD3E	-	0x01	OK
RX 1420	+4287 =44079791	5	ACK	0	0	0	0	0xCC									OK

Figura 4.12. Recepción correcta del reconocimiento (Ack. req).

La figura 4.11 representa un error que solo estuvo presente en las pruebas a velocidad máxima, cuya aparición estuvo limitada a dos veces durante toda la prueba. La presencia de este error no pertenece a la red puesto que no cuenta en la trama con una Red de Área Personal (PAN), por lo que no represento una problemática en la comunicación de los dispositivos.

### 4.3.4 RSSI

El parámetro RSSI se identificó de acuerdo en cómo estaban conectados los módulos en la red. En este caso el módulo de la infraestructura presentó un valor de -30 dBm, esto se debe a que se encontraba a menos de 1m del sniffer, el cual es el que proporciona este valor. Cuando el V1 ingresa a la red, el valor más bajo que se detectó fue el de -87 dBm, lo cual indica que era lo más lejano que se podía detectar. Pero en el momento en que se encontraba lo más cerca del sniffer se obtuvo un valor de -73 dBm.

## 4.4 Conclusiones

Con las pruebas realizadas se observó la trama en movimiento, en donde se encontraron errores cuando se tenía una mayor velocidad a diferencia de una menor velocidad, los cuales no afectaron demasiado a la comunicación debido a que permitieron la llegada del mensaje y que se cumpliera el objetivo.

Estas pruebas sirvieron para entender el funcionamiento de la red mediante el envío de mensajes, comprobando los tipos de broadcast, datos y ACK. Además, de acuerdo con las reglas de comunicación, en el último campo correspondiente al de Verificación de Secuencia se comprueba que la trama llegó correcta o con error, lo cual implicaba enviarla nuevamente y gastar recursos de la red.

# Capítulo 5. Conclusiones y trabajo a futuro

La mayor parte de la red diseñada e implementada en el presente proyecto se desarrolló en hardware, pues la estructura principal del trabajo está principalmente enfocada en la implementación de una red bajo el estándar de comunicación IEEE 802.15.4, el cual mediante los módulos Particle Xenón y Particle Argón se logró satisfactoriamente implementar y analizar a detalle, por medio de la trama, dicha red de manera escalada. A continuación, se destacan los puntos más importantes:

- La utilización del estándar de comunicación IEEE 802.15.4 facilitó la creación de la VANET debido a que existe en el mercado comercial una variedad de dispositivos embebidos capaces de trabajar bajo dicho estándar, en caso de requerir una red especializada se pueden utilizar dispositivos capaces de trabajar bajo esos requerimientos, sin embargo, esto podría incrementar significativamente el costo.
- Se realizaron pruebas en ambientes interiores y exteriores con el fin de observar la fidelidad de la red, haciendo uso del parámetro RSSI. En el proceso de las pruebas en interiores se detectaron variaciones debido a los objetos que se encontraban a su alrededor, a pesar de ello, no representó problemas en la comunicación de los módulos.
- Durante las pruebas en exterior no se presentaron perturbaciones en la red por interferencia de otros medios, pues se realizaron llamadas y envío de datos por la Internet mientras se tenía en funcionamiento la red, con lo anterior la banda de transmisión de 2.4 GHz puede ser utilizada para la comunicación de las VANET, considerando que este proyecto es sólo un prototipo.
- En el caso de la salida a Internet por el router inalámbrico, se encontró saturación de paquetes, es decir, cuando el módulo Argón (la infraestructura)

intentaba sacar el dato al servidor de Particle, este módulo comenzaba a tener pérdidas en la conexión lo que a su vez provocaba que se reiniciara la conexión en la VANET durante la puesta en marcha de la red.

- Durante la realización de una prueba, se le permitió a un vehículo continuar avanzando hasta que éste perdiera total conexión con la infraestructura, llegando a tener una distancia máxima de 27 metros, lo que indica entonces que se garantiza un funcionamiento de la red dentro de esa distancia, después de ello no se garantiza debido a la existencia de errores de conexión entre los módulos de los vehículos y la infraestructura.
- Los dispositivos embebidos cuentan con un retardo en la conexión la primera vez que ingresan a la red, dicho retardo se encuentra dentro de la arquitectura de los módulos, por lo que en algunas pruebas representó una problemática debido a que existían desconexiones completas con la red.
- El presente trabajo sirve de base para el entendimiento de los parámetros que conforman una trama de red. Así también, una base en la creación de redes vehiculares.

Como trabajo a futuro se realizan las siguientes recomendaciones:

- Hacer uso de sistemas embebidos diferentes a los utilizados en la realización de este proyecto. La principal razón de esta recomendación es el hecho de que al día de la realización de este proyecto el módulo Xenón ha quedado discontinuado por la empresa, por lo que su adquisición y actualizaciones de software son nulas.
- En caso de querer llevar este proyecto a un escenario de la realidad se recomienda la utilización de hardware especializado en altas velocidades, es decir, con tasas de transmisión más altas que las presentadas en este trabajo, esto debido a los retardos de conexión antes mencionados.

# Referencias

- [1] P. Mutalik and V. C. Patil, "A survey on vehicular ad-hoc network [VANET's] protocols for improving safety in urban cities," *2017 International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon)*, Bangalore, 2017, pp. 840-845. doi: 10.1109/SmartTechCon.2017.8358491
- [2] M. Y. Taleb, S. Merniz and S. Harous, "Congestion control techniques in VANETs: A survey," *2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Valencia, 2017, pp. 484-488. doi: 10.1109/IWCMC.2017.7986333
- [3] J. Wang, C. Jiang, K. Zhang, T. Q. S. Quek, Y. Ren and L. Hanzo, "Vehicular Sensing Networks in a Smart City: Principles, Technologies and Applications," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 25, no. 1, pp. 122-132, February 2018. doi: 10.1109/MWC.2017.1600275
- [4] U. D. B. S. o. I. & C. Sciences, «Security and Privacy in Location-based MANETs/VANETs,» Septiembre 2011. [En línea]. Available: <https://www.ics.uci.edu/~keldefra/manet.htm>. [Último acceso: 28 Enero 2020].
- [5] Urquiza A.L., Tripp B.C. and Romero M.A., "Mitigation of packet duplication in VANET unicast protocols", *Ad Hoc Networks* 52 (2016) 63-77.
- [6] Jaballah W., Conti M., Mosbah M., and Palazzi C., "The impact of malicious nodes positioning on vehicular alert messaging system", *Ad Hoc Networks* 52 (2016) 3 -16.
- [7] J. C. Mukherjee, A. Gupta and R. C. Sreenivas, "Event Notification in VANET With Capacitated Roadside Units," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 7, pp. 1867-1879, July 2016. doi: 10.1109/TITS.2015.2511145
- [8] S. Hu, Y. Jia and C. She, "Performance Analysis of VANET Routing Protocols and Implementation of a VANET Terminal," *2017 International Conference on Computer Technology, Electronics and Communication (ICCTEC)*, Dalian, China, 2017, pp. 1248-1252. doi: 10.1109/ICCTEC.2017.00272
- [9] Y. Wang, Z. Ding, F. Li, X. Xia and Z. Li, "Design and implementation of a VANET application complying with WAVE protocol," *2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, Chennai, 2017, pp. 2333-2338. doi: 10.1109/WiSPNET.2017.8300177
- [10] Herrera M. M. "Estudio de una VANET para aplicaciones en ciudades inteligentes". Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias de la Computación, BUAP, Diciembre 2019.
- [11] Google LLC, «Acerca de Waze,» 2020. [En línea]. Available: [https://support.google.com/waze/answer/6071177?hl=es&ref\\_topic=9022747](https://support.google.com/waze/answer/6071177?hl=es&ref_topic=9022747). [Último acceso: 13 Febrero 2020].
- [12] HERE Technologies ; Mitsubishi Electric Corporation, «Mitsubishi Electric and HERE develop road hazard alert system to improve driver safety,» 15 Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://www.here.com/en/company/newsroom/press-releases/2019-15-05>. [Último acceso: 13 Febrero 2020].
- [13] A. Anjomshoa, F. Duarte, D. Rennings, T. J. Matarazzo, P. deSouza and C. Ratti, "City Scanner: Building and Scheduling a Mobile Sensing Platform for Smart City Services," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 6, pp. 4567-4579, Dec. 2018. doi: 10.1109/JIOT.2018.2839058

- [14] Awais J. M., Ben H. E. and Znaidi W. (2016). "Security in Intelligent Transport System for Smart Cities: From Theory to Practice," MDPI Sensors, 161 879. doi:10.3390/s16060879www
- [15] Andorka, Steven & Rambow-Hoeschele, Kira. (2020). "Review of Technological and Economic Considerations on Future Vehicle Design: Autonomous, Connected, Electric, and Shared Vehicles". doi: 10.1007/978-3-030-28925-6\_15.
- [16] Elgarej, Mouhcine & Mansouri, Khalifa & Mohamed, Youssfi. (2018). "Solving Traffic Routing System using VANet Strategy Combined with a Distributed Swarm Intelligence Optimization". Journal of Computer Science. 14. doi: 10.3844/jcssp.2018.1499.1511.
- [17] Jindal, Vinita & Bedi, Punam. (2016). Vehicular Ad-Hoc Networks- Introduction, Standards, Routing Protocols and Challenges. International Journal of Computer Science Issues, IJCSI. 13. 44-55. doi: 10.20943/01201602.4455.
- [18] G. Luo et al., "Cooperative vehicular content distribution in edge computing assisted 5G-VANET," in China Communications, vol. 15, no. 7, pp. 1-17, July 2018. doi: 10.1109/CC.2018.8424578
- [19] Taleb, M.Y., Merniz, S., & Harous, S. (2017). Congestion control techniques in VANETs: A survey. 2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 484-488.
- [20] Roque C. S. "Análisis del parámetro RSSI en una WDSN para el monitoreo de transporte Universitario." Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias de la Electrónica, BUAP, Febrero 2018.
- [21] S. Wang, A. Huang and T. Zhang, "Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 for V2V Communication in VANET," 2013 International Conference on Computational and Information Sciences, Shiyang, 2013, pp. 1603-1606. doi: 10.1109/ICCIS.2013.420
- [22] S. C. L. 2019, «AlphaBot Mobile Robot for Raspberry Pi/Arduino,» 2019. [En línea]. Available: <https://shop.sb-components.co.uk/products/alphabot-mobile-robot-development-platform>. [Último acceso: 27 Octubre 2019].
- [23] Particle, «PARTICLE XENON: BLUETOOTH + MESH,» 2019. [En línea]. Available: <https://docs.particle.io/xenon>. [Último acceso: 27 Octubre 2019].
- [24] Particle, «PARTICLE ARGON: WI-FI + BLUETOOTH + MESH,» 2019. [En línea]. Available: : <https://docs.particle.io/argon/>. [Último acceso: 27 Octubre 2019].
- [25] WAVESHARE, «Photo Interrupter Sensor, Speed Measuring,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.waveshare.com/product/robotics/alphabot/photo-interrupter-sensor.htm>. [Último acceso: 27 Octubre 2019].
- [26] J. J. M. Fuentes, Fundamentos de Radiación y Radiocomunicación, Sevilla, España: Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla. 2ª Edición, 2013.
- [27] Particle, «XENON DATASHEET,» 2019. [En línea]. Available: <https://docs.particle.io/assets/pdfs/datasheets/xenon-datasheet.pdf>. [Último acceso: 27 Octubre 2019].

[27] Particle, «ARGON DATASHEET,» 2019. [En línea]. Available: <https://docs.particle.io/assets/pdfs/datasheets/argon-datasheet.pdf>. [Último acceso: 27 Octubre 2019].

[29] K. Benkic, M. Malajner, P. Planinsic and Z. Cucej, "Using RSSI value for distance estimation in wireless sensor networks based on ZigBee," *2008 15th International Conference on Systems, Signals and Image Processing*, Bratislava, 2008, pp. 303-306, doi: 10.1109/IWSSIP.2008.4604427.

[30] C. S. Inc., «SNR, RSSI, EIRP and Free Space Path Loss,» 2019. [En línea]. Available: <https://community.cisco.com/t5/wireless-mobility-documents/snr-rssi-eirp-and-free-space-path-loss/ta-p/3128478>. [Último acceso: 22 Agosto 2019].