

## **DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA COMUNICACIÓN ENTRE VEHÍCULOS QUE CONFORMAN EL SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO BASADO EN EL USO DE REDES AD-HOC VEHICULARES (VANETS)**

MARÍA E. VILLAPOL<sup>1</sup>, DAVID PEREZ ABREU<sup>1</sup>, ADRIÁN BOTTINI<sup>2</sup>, ALECIA ELEONORA ACOSTA<sup>3</sup>,  
CHRISTIAN PUELLO<sup>1</sup>, JACKSON MORENO<sup>1</sup>, JOSÉ MIGUEL HERRERA<sup>1</sup>, EDISON ESPINOSA<sup>4</sup>,  
ARMANDO ALVAREZ<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidad Central de Venezuela, Escuela de Computación, Laboratorio ICARO.

e-mails: maria.villapol@ciens.ucv.ve / david.perez@ciens.ucv.ve / christianpuello@hotmail.com /  
jackson2978@hotmail.com / jose.miguel2811@gmail.com

<sup>2</sup> Universidad Central de Venezuela, Escuela de Computación, CIOMMA.

e-mail: adrian.bottini@ciens.ucv.ve

<sup>3</sup> Universidad Central de Venezuela, Escuela de Computación, ISYS.

e-mail: eleonora.acosta@ciens.ucv.ve

<sup>4</sup> Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

e-mails: egespinosa1@espe.edu.ec / faalvarez@espe.edu.ec

Recibido: marzo 2015

Aprobado para publicación: noviembre 2015

### **RESUMEN**

Aunado al crecimiento de la ciudad están las necesidades de transporte público. Este es el caso de la ciudad de Caracas, donde el sistema de transporte superficial, constituido por autobuses, minibuses y rústicos, trabaja de forma desarticulada, carece de control y fiscalización, consume tiempos de recorrido muy largos debido al gran volumen de tráfico vehicular, además de ser inseguro. Las unidades de transporte no cuentan con dispositivos de comunicación, ni con una red de comunicación articulada que permita intercambiar información; tal como ubicación del vehículo, condiciones de tráfico, condiciones viales, condiciones del tiempo, incidentes de seguridad, entre otros, ni entre ellos ni con sus supervisores. En este trabajo se presenta el desarrollo de un prototipo de un sistema de comunicación entre unidades de transporte público basado en el uso de las Redes Ad-Hoc Vehiculares (Vehicular Ad-Hoc Networks, VANETS). Dicho desarrollo involucra un método para la caracterización del tráfico vehicular de la ciudad, el diseño e implementación de un dispositivo para la comunicación inter vehicular que soporta el estándar IEEE 802.11p, prueba del dispositivo en ambientes reales controlados y el estudio de la red utilizando diversos protocolos de enrutamiento. Los resultados de este trabajo son un punto de partida para la implantación de un sistema de comunicación inter vehicular para la flota de unidades que forman el transporte público del Distrito Metropolitano de Caracas y de otras ciudades del país.

*Palabras clave:* VANETS, transporte público, Caracas, tráfico vehicular, protocolos de enrutamiento

### **DESIGN OF A SYSTEM FOR THE COMMUNICATION AMONG VEHICLES THAT ARE PART OF THE PUBLIC TRANSPORT SYSTEM BASED ON THE USE OF VEHICULAR AD-HOC NETWORKS (VANETS)**

#### **ABSTRACT**

As cities grow, the needs for public transport increase. In Caracas the public transportation system includes buses, minibuses and rustics and it operates in an unconnected way. It is not controlled or supervised and it makes very long journeys due to the large volume of traffic besides being unsafe. Transport units do not have communication devices connected through a communication network to exchange information such as vehicle location, traffic conditions, road conditions, weather conditions, security incidents, etc. either among the drivers or their supervisors. In this paper, we propose a communication system prototype for public transport units based on the use of Vehicular Ad-Hoc Networks (VANETS). This work involves a method for the characterization of vehicular traffic in the city, the design and implementation of a device for inter-vehicle communication that supports the IEEE 802.11p standard, the test of the device in real environments and the study of the system using several routing protocols. The results of this research represent the beginning for the implementation of an inter-vehicular communication system for the Caracas Metropolitan District units as well as for the public transport units of other cities of the country.

*Keywords:* VANETS, public transport, Caracas, vehicular traffic, routing protocols

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento del transporte urbano y las necesidades de transporte público están estrechamente ligados al crecimiento de las grandes ciudades, tales como Caracas. El transporte público superficial del Distrito Metropolitano de Caracas está constituido por autobuses, minibuses y rústicos operados en su mayoría por organizaciones privadas, tales como asociaciones civiles, cooperativas y compañías que cubren decenas de rutas. Actualmente, el sistema de transporte superficial trabaja de forma desarticulada, carece de control y fiscalización, consume tiempos de recorrido muy largos debido al gran volumen de tráfico vehicular y es inseguro.

Las unidades de transporte no cuentan con dispositivos de comunicación, ni con una red de comunicación articulada que permita intercambiar información acerca de la ubicación del vehículo, condiciones de tráfico, condiciones viales, condiciones del tiempo, incidentes de seguridad, o cualquier otra eventualidad, entre ellos y con sus supervisores. Algunas unidades de transporte como las de taxis, agrupadas en líneas, han adquirido unidades de radio que permiten el intercambio de información de voz entre miembros de dicha línea. En su mayoría los choferes de unidades de autobuses, minibuses y taxis cuentan con teléfonos celulares, de uso personal, que les permiten reportar algún incidente con el vehículo. Adicionalmente, el sistema de transporte público del Distrito Metropolitano de Caracas, así como en general del país, no utiliza ningún sistema de localización, tal como Global Positioning System (GPS), que son importantes para mantener la localización de estos vehículos y permitir su rastreo y monitoreo constante.

Recientemente ha surgido un tipo de redes cuyo objetivo es permitir la comunicación entre vehículos con diferentes propósitos: seguridad vial, transportación eficiente, entretenimiento e información (Hartenstein y Laberteaux, 2008). Este tipo de redes ha sido definida como Redes Ad-Hoc Vehiculares (Vehicular Ad-Hoc Network, VANETs). Estas redes son consideradas un tipo particular de redes móviles Ad-Hoc, definidas como una colección de nodos auto configurables y auto organizados que se conectan formando una topología temporal y arbitraria sin la existencia de una infraestructura central. Las VANETs se establecen entre vehículos, los cuales usualmente están en movimiento y circulan por lugares donde la comunicación puede perderse fácilmente debido a interferencias y otros factores que afectan las comunicaciones inalámbricas.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un prototipo de un sistema de comunicación entre unidades de transporte

público basado en VANETs. Dicho desarrollo involucra un método para la caracterización del tráfico vehicular de la ciudad, el diseño e implementación de un dispositivo para la comunicación intervehicular que soporta el estándar IEEE 802.11p (IEEE, 2007), prueba del dispositivo en ambientes reales controlados y el estudio de la red utilizando diversos protocolos de enrutamiento.

La creación de un sistema de comunicación inalámbrica que permita comunicar las unidades de transporte público del Distrito Metropolitano de Caracas es un paso inicial para lograr una mejor articulación entre las unidades de este sistema a la vez que permitiría abordar ciertos problemas relacionados al monitoreo de estas unidades, rastreos en caso de incidentes de seguridad, recepción de alertas, entre otros. Actualmente, algunos sistemas de transporte público, tales como algunas líneas de taxis, utilizan sus propios sistemas de comunicación vía radio, que les permiten comunicarse entre miembros de su propia línea. Igualmente, algunos dueños de unidades han integrado en sus vehículos sistemas de localización basados en GPS. Sin embargo, estas soluciones son aisladas y no contribuyen a aliviar el problema del sistema de transporte de forma global. Además, estas soluciones implican un gasto en equipos y en servicios que en muchos casos es trasladado a los usuarios del servicio.

Proyectos como el planteado en este artículo no se han llevado a cabo en nuestro país pero si en otros países, como es el caso de la red BUSNET, una red vehicular Ad-Hoc desarrollada en Shanghai (Sede, Li, Li & Wu, 2008). En España, CELTIE Telecommunications Solutions ha creado el proyecto CARLINK para desarrollar una plataforma inteligente inalámbrica de servicio de tráfico entre carros. Su aplicación primaria es la transmisión de datos relacionados con el tiempo de recorrido, gestión del tráfico de transporte urbano y difusión de información urbana (CELTIE Telecommunications Solutions). El proyecto Vehicle Information and Communication System (VICS) desarrollado en Japón describe un entorno donde los vehículos tienen un sistema de navegación a bordo a través del cual reciben información acerca del tiempo, condiciones del camino, condiciones de tráfico y otros datos relacionados desde unidades colocadas a los lados de las calles (Vehicle Information and Communication System (VICS), s.f.). Otros proyectos que involucran el uso de las VANETs son resumidos en (Abdalla, Abu-Rgheff & Senouci, 2007).

Este artículo se divide en las siguientes secciones. Las secciones uno y dos introducen las redes Ad-Hoc vehiculares y los protocolos de enrutamiento en redes

VANETs. Luego, en la sección tres se detalla el método usado en esta investigación. Los resultados del trabajo son expuestos en la sección cuatro. Finalmente, la sección cinco concluye el artículo mencionando posibles trabajos futuros.

## 1. REDES AD-HOC VEHICULARES

Una Red Ad-Hoc Vehicular (Vehicular Ad-Hoc Network, VANET) es una red móvil cuyos nodos se corresponden con vehículos y éstos forman dicha red en pleno movimiento. El enrutamiento de los paquetes es responsabilidad de los nodos que forman parte de la red, ya que la red no tiene una infraestructura fija. Este tipo de redes se ha desarrollado como parte de los sistemas inteligentes de transporte (Intelligent Transport Systems, ITS) para realizar mejoras en el rendimiento de los sistemas de transporte. Uno de los objetivos principales de ITS es mejorar la seguridad en las carreteras y reducir congestión de tráfico.

Una VANET se caracteriza por los siguientes aspectos: (a) alta movilidad, los nodos de las redes VANETs se distinguen por su alta velocidad relativa; (b) patrones de movilidad restringidos y predecibles, los movimientos de los nodos en las VANETs se rigen por reglas restringidas, lo que los hace predecibles, al menos en el corto plazo; (c) rápido cambio en la topología, los nodos de una VANET se caracterizan por su alta velocidad que conlleva a frecuentes cambios en la topología de la red, lo cual introduce alta sobrecarga de comunicación para el intercambio de la información con respecto a la topología; y (d) localización, los vehículos pueden usar GPSs para identificar su ubicación con precisión.

Las redes vehiculares están compuestas de nodos móviles, equipados con una unidad a bordo (On-Board Unit, OBU) y nodos fijos llamados unidad en carretera (Road-Side Unit, RSU) unidos a la infraestructura que se despliega a lo largo de la carretera. Las OBUs se comunican entre sí y con las RSUs de una manera Ad-Hoc. Principalmente hay dos tipos de escenarios de comunicación en una VANET: Vehículo a vehículo (Vehicle-to-Vehicle, V2V) y vehículo a unidad en carretera (Vehicle-to-RSU, V2R). Las RSUs también pueden comunicarse entre sí y a través de otras redes como internet.

En esta sección se ha introducido brevemente el concepto de VANET y sus principales componentes. Los protocolos más usados para el enrutamiento de paquetes en estas redes se discuten en la siguiente sección.

## 2. ENRUTAMIENTO EN REDES VANETS

Existen diversos protocolos de enrutamiento para las VANETs (Lang, 2003). En este trabajo se describirán brevemente los protocolos usados en la investigación, a saber: DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector), OLSR (Optimized Link State Routing Protocol), FSR (Fisheye State Protocol), AODV (Ad-Hoc On-Demand Distance Vector), DSR (Dynamic Source Routing) y C2CNET.

*DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector)*

Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) (Lang, 2003) es un protocolo proactivo basado en el protocolo de información de enrutamiento (Routing Information Protocol, RIP). El protocolo almacena tablas con todos sus destinos accesibles junto con el siguiente salto, la métrica y un número de secuencia de la entrada en la tabla generado por el nodo destino. Las tablas se mandan por difusión (broadcast) de forma periódica o cuando ocurre un cambio significativo de la topología de red. Una ruta es considerada mejor que otra si tiene un número de secuencia mayor o, en caso de empate, si la distancia al destino es menor.

*OLSR (Optimized Link State Routing Protocol)*

Optimized link state routing (OLSR) (Clausen and Jacquet, 2003) es un protocolo proactivo basado en el estado de enlace optimizado, a través del uso de tablas de enrutamiento de menor tamaño y menor número de retransmisiones desde cada nodo durante los períodos de inundación, esto último a través del uso de multi point relays (MPRs). Los nodos intercambian mensajes hello periódicamente con sus vecinos, que permiten detectar la presencia de cada uno de sus nodos vecinos, así como recoger información referente al estado del enlace con ese vecino. En los mensajes de hello se indica si el nodo es un MPR, esto le permite a los demás nodos elegir dentro de su conjunto de vecinos un subconjunto de MPRs. Así, cada nodo tiene conocimiento de un subconjunto de MPRs que le permite tener conectividad con todos los demás distantes a uno o dos saltos. De este modo, sólo los MPRs se encargarán de retransmitir los mensajes por difusión (broadcast). Para descubrir la topología de la red, los nodos intercambian información acerca del estado de enlace que los conectan con los nodos MPR. Los intercambios son periódicos o generados por eventos relativos a la ruptura de enlace.

### *FSR (Fisheye State Protocol)*

Fisheye state protocol (FSR) (Gerla, Hong & Pei, 2002) es un protocolo proactivo basado en el concepto de estado de enlaces y en el mecanismo denominado “Ojo de un pez”, mediante el cual se capturan con detalle los píxeles que se encuentran cerca del punto focal. El detalle disminuye a medida que se aumenta la distancia al punto focal. Así, FSR mantiene distancias exactas e información detallada de los nodos más cercanos y pierde progresivamente detalles a medida que la distancia al nodo aumenta.

FSR, de manera similar a los algoritmos de estado de enlace, envía mensajes de información de forma periódica o cuando ocurre un evento de ruptura de enlace. Estos mensajes se intercambian únicamente entre vecinos locales. Las entradas correspondientes a nodos más cercanos son propagadas más frecuentemente, así cuando un paquete se acerca a su destino, encuentra información de encaminamiento más exacta.

### *AODV (Ad-Hoc On-Demand Distance Vector)*

El protocolo AODV (Perkins, Belding-Royer & Das, 2003) es reactivo y está basado en el algoritmo de vector distancia. Si un nodo origen N1 desea enviar un mensaje a un nodo destino N2 y no posee una ruta válida hacia este nodo, comienza el mecanismo de descubrimiento (Path Discovery). Primero se difunde un mensaje con una petición de ruta, (Route Request) (RREQ) a todos sus vecinos. En este mensaje se incluye su dirección, la dirección del nodo destino N2, y el último número de secuencia recibido de N2, esto solo si se hubiera recibido algún dato anteriormente. Este mensaje inunda la red y los nodos por los que pasa guardan una ruta inversa hacia N1. Cuando este mensaje llega a un nodo que dispone de la ruta hacia N2, se comprueba el número de secuencia para el destino N2, si éste es mayor que el incluido en el mensaje, se ha encontrado una ruta válida hacia N2 y el nodo que dispone de la entrada hacia N2 manda un mensaje de respuesta (Route Reply) (RREP) de vuelta hacia N1, siguiendo la ruta creada durante la difusión del RREQ. En este mensaje se incluye el último número de secuencia recibido por el emisor del mensaje RREP. Los nodos que reciben el RREP guardan una entrada con la información de la ruta hacia N2, que recibieron del nodo que ha respondido el mensaje, aunque solo se guarda en la tabla el siguiente salto y no la ruta entera. Si pasado un cierto tiempo no se ha recibido ningún RREP, N1 considera que no hay ruta válida hacia N2 en ese momento.

### *DSR (Dynamic Source Routing)*

El protocolo dynamic source routing (Johnson, Hu and Maltz, 2007) es reactivo e incluye dos mecanismos: el descubrimiento y el mantenimiento de rutas. El descubrimiento de rutas permite a un nodo origen N1 obtener la ruta hacia N2 a través del envío por difusión (broadcast) de mensajes de route request packet (RREQ). La dirección destino, la dirección del nodo fuente y un número único de identificación, forman el contenido de este paquete. Cada nodo que recibe un paquete RREQ revisa si conoce la ruta hacia el destino; si no la conoce, se reenvía el paquete, de lo contrario contesta en sentido inverso con un route reply packet (RREP). Todos los nodos que participan en el reenvío del RREP añaden su dirección en la cabecera del paquete, creando de ese modo la ruta completa hasta el destino.

El mantenimiento de rutas consiste en la capacidad de detectar que una ruta almacenada en una tabla ya no se puede usar debido a un cambio de topología. Se producen paquetes de error del tipo route error packets en un nodo, cuando la capa de enlace encuentra un problema grave de transmisión. Este paquete de error contiene las direcciones de los dos nodos que están unidos por el enlace que falló. En este caso, si N1 conoce otra ruta hacia N2 se puede usar, o bien se vuelve a invocar el mecanismo de descubrimiento de rutas para reemplazar la ruta caída hacia N2.

### *C2CNET*

C2CNet (Thouraya, Manabu, Thierry & Lamjed, 2011) es un protocolo que permite el enrutamiento y direccionamiento geográfico y usa el algoritmo de enrutamiento basado en posición denominado GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing). GPSR requiere que cada nodo sea capaz de obtener su ubicación actual través de un receptor, tal como un GPS. Cada nodo aprende de la existencia de sus vecinos directos mediante el intercambio de mensajes periódicos de hello. Para tomar las decisiones de enrutamiento, un nodo origen necesita saber la posición del destino. El nodo fuente envía los paquetes a su vecino que está geográficamente más cercano a su destino. Este procedimiento se aplica de forma recursiva por los nodos intermedios hasta que el destino final se alcanza.

Con el estudio teórico de los protocolos de enrutamiento más utilizados en redes VANETs, y luego de exponer el objetivo fundamental de esta investigación (desarrollo de un sistema de comunicación entre unidades de transporte público basado en VANETs); en la siguientes secciones se discute el método de implementación usado y los resultados obtenidos.

### 3. MÉTODO

El método empleado en el desarrollo de esta investigación constó de las siguientes actividades: (1) estudio de las tecnologías de comunicación inalámbricas, (2) revisión teórica/práctica de los protocolos de enrutamiento, (3) caracterización del tráfico vehicular de Caracas, (4) realización de estudios de simulación, (5) determinación del prototipo de dispositivo móvil para las unidades de transporte, (6) desarrollo de una aplicación para controlar la seguridad vehicular y mejorar la eficiencia del transporte, (7) realización de pruebas basadas en testbed y diseño de la red VANET. A continuación se describe brevemente cada una de estas actividades.

#### *Estudio de las tecnologías de comunicación inalámbricas*

Uno de los aspectos del diseño de la red inalámbrica inter vehicular es determinar cuál tecnología es la más apropiada para interconectar los dispositivos móviles viajando en los vehículos. Estas tecnologías difieren en aspectos tales como, máxima tasa de transferencia, potencia de transmisión, costos y área máxima de cobertura. Se debe realizar un estudio de estas tecnologías tendiente a determinar la mejor opción para soportar la comunicación de los dispositivos móviles.

#### *Revisión de los protocolos de enrutamiento*

Existe una amplia diversidad de protocolos de enrutamiento desarrollados para las VANETs. En Lang, (2003) y (Waharte, Boutaba, Iraqi & Ishibashi (2006) se revisan algunos de ellos. Un estudio de estos protocolos es un primer paso para determinar cuál o cuáles de ellos se podrían utilizar en el desarrollo propuesto en este trabajo, y así proceder a su posterior evaluación usando simulación.

#### *Caracterización del tráfico vehicular de Caracas*

Hasta donde los autores han podido investigar, no existe ninguna caracterización del tráfico vehicular de la ciudad de Caracas. Esto es importante para la evaluación del sistema de comunicación y el estudio de factibilidad del mismo. Para la caracterización del tráfico es necesario contar con herramientas de hardware y software que permitan capturar información sobre el movimiento del transporte, en particular del relacionado con el transporte público de Caracas. Esta información se debe analizar con el objetivo de desarrollar un modelo estocástico que describa el tráfico urbano.

#### *Realización de estudios de simulación*

El rendimiento de la red vehicular debe ser determinado para ver si cumple con la calidad de servicio requerida por las aplicaciones que se utilizarán en esta red. Para ello lo mejor es utilizar simulación, ya que una prueba en ambiente real requeriría que una gran mayoría de los vehículos cuente con un dispositivo de interconexión; además de la dificultad que representan las actividades de logística para medir el tráfico en un escenario automovilístico denso. A fines de realizar las simulaciones correspondientes, es necesario establecer los modelos de generación de tráfico de datos y de movilidad de los vehículos; así como, las herramientas de simulación a ser utilizadas. Algunos ejemplos de estas herramientas son: NS2 (Network Simulator 2, s.f.), PtolemyII/Visual Sense (Visual Sense / Ptolemy II, s.f.) y GrooveNet (GrooveNet: Vehicular Network Virtualization Platform, s.f.).

#### *Determinación del prototipo de dispositivo móvil para las unidades de transporte*

En esta etapa se debe realizar un estudio de diversos dispositivos móviles que podrían usarse en las unidades de transporte. Este estudio debe incluir criterios de comparación, tales como usabilidad del equipo por parte de los choferes, costo del dispositivo, capacidad de procesamiento y facilidades de comunicación. A partir de este estudio se debe determinar si se utilizará un equipo disponible en el mercado o se desarrollará un dispositivo móvil para ser instalado en cada una de las unidades de transporte.

#### *Desarrollo de una aplicación para controlar la seguridad vehicular y mejorar la eficiencia del transporte*

En esta fase se desarrollará una aplicación que funcione en dispositivos móviles, tales como teléfonos inteligentes y/o tabletas, para controlar aspectos de la seguridad vehicular, tales como notificaciones en caso de riesgos en la vía y notificaciones de vehículo parado o lento.

#### *Realización de pruebas basadas en testbed*

Una vez que se tiene definido el prototipo de dispositivo móvil vehicular, se podrán realizar pruebas reales en el laboratorio y posteriormente con vehículos de transporte público del Distrito Metropolitano de Caracas.

## *Diseño de la red VANET*

Basado en los resultados de las fases anteriores, se realizará el diseño de la red de comunicación vehicular Ad-Hoc que pueda operar en el Distrito Metropolitano de Caracas y sus recomendaciones para su adaptación en otros centros urbanos del país. Los resultados de esta fase no se incluyen en este artículo.

## **4. RESULTADOS**

A continuación, se presentan algunos de los resultados más relevantes obtenidos en esta investigación, relacionados con las tecnologías de comunicación, la caracterización estadística de la velocidad del tráfico de vehículos de transporte colectivo de Caracas, el desarrollo de un prototipo del dispositivo de comunicación a ser instalado en las unidades de transporte y el análisis de los protocolos de enrutamiento.

### *Tecnologías de comunicación inalámbricas*

A pesar de que existen diversas tecnologías de comunicación que podrían soportar la comunicación Ad-Hoc (Moreno y Herrera, 2012); un estudio de las tecnologías para VANETs (Zeadally, Hunt, Chen, Irwin & Hassan, 2012) muestra que el estándar IEEE 802.11 es el más conveniente para soportar la comunicación inter vehicular. Tres argumentos importantes que soportan el uso de la tecnología mencionada previamente (IEEE 802.11) son: (1) amplio rango de cobertura y escalabilidad en el número de dispositivos, (2) menores costos en el acceso y envío de datos, (3) existencia de una enmienda a la tecnología original (IEEE 802.11p) que agrega el soporte necesario para el intercambio de datos entre vehículos, y vehículos/infraestructura de comunicación desplegada al borde del camino. En este trabajo se usa el estándar 802.11.

### *Caracterización estadística de la velocidad del tráfico de vehículos de transporte colectivo de Caracas*

Se propuso un procedimiento para la caracterización de la velocidad de vehículos de transporte colectivo (Bottini, Villapol, Arismendi & Mendoza, 2014). Para caracterizar estadísticamente la velocidad de los vehículos de transporte colectivo de pasajeros, se recopilaron trazas del recorrido de un microbús durante sus viajes en una ruta urbana en Caracas, usando una herramienta para teléfonos inteligentes con sistema operativo Android, desarrollada como parte de este trabajo (Bottini, Villapol, Arismendi & Mendoza, 2014). Los datos recopilados incluyen: latitud, longitud, distancia recorrida (m) y velocidad (m/s). La

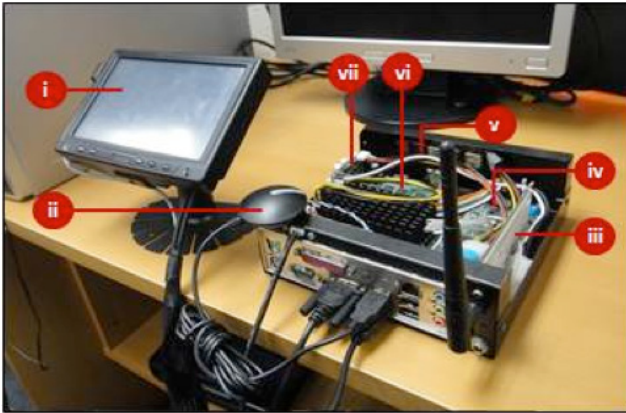
descripción detallada del estudio y los resultados obtenidos se presentan en (Bottini, Villapol, Arismendi & Mendoza, 2014). El procedimiento allí establecido es de utilidad para caracterizar la velocidad del tráfico del transporte público de la ciudad. A partir del procedimiento definido, y en función de los criterios establecidos, se puede además desarrollar un algoritmo computacional que facilite la caracterización de la velocidad del tráfico vehicular.

### *Prototipo del dispositivo de comunicación*

Después de un estudio de los posibles dispositivos que podrían soportar la comunicación inter vehicular (Moreno y Herrera, 2012) se decidió construir un dispositivo móvil para ser instalado en las diversas unidades de transporte por su costo, diseño y uso específico (para no ser objetivo de posibles hurtos) y versatilidad a fin de instalar protocolos de comunicación y aplicaciones, estas dos últimas característica no están presentes en otros dispositivos de uso general como Smartphone y Tabletas que fueron considerados en la etapa de diseño del proyecto (Moreno y Herrera, 2012). Se definió un conjunto de módulos de hardware y software que debían formar parte de la solución, considerando dimensiones físicas, interfaces de comunicación, costos, entre otros aspectos.

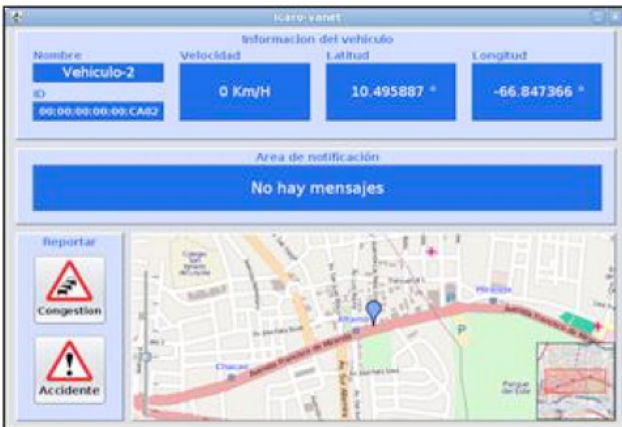
La arquitectura del equipo a nivel de hardware se muestra en la figura 1 y consiste de i) la pantalla táctil, ii) el receptor GPS, iii) la tarjeta de red inalámbrica, iv) la tarjeta madre, v) la memoria Flash USB, vi) la tarjeta de memoria RAM, y vii) la fuente de poder.

A nivel de software, se instaló Debian Live 6.0 en la memoria flash USB con una imagen binaria de 3 GB para persistencia; adicionalmente se configuraron los parámetros de arranque en modo seguro (failsafe) para evitar incompatibilidad con la tarjeta madre. Se aplicaron los parches para el módulo ath5k propuestos en el proyecto GDCDC (De Jongh, 2011), que hacen funcionar la tarjeta con chipset Atheros AR5414 de acuerdo a las especificaciones dictadas en el estándar IEEE 802.11p. Del mismo modo, se configuraron los módulos Xinput-calibration y usbtouchscreen para el funcionamiento de la pantalla táctil. Se configuró Cargeo6 el cual implementa el protocolo de enrutamiento C2CNet, el cual extiende el alcance de IPv6 permitiendo la distribución de paquetes a todas las OBU y RSUs ubicadas en una zona geográfica específica, en función de su latitud y longitud.



**Figura 1.** Componentes del dispositivo para la comunicación inter vehicular

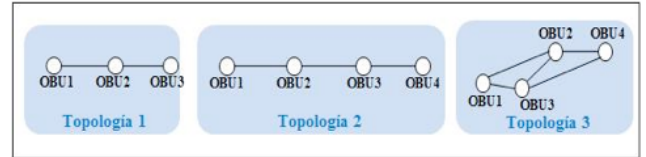
Finalmente, se desarrolló la aplicación ICARO-VANET (usando Java) para enviar y recibir dos tipos de mensajes: accidentes y congestión. Esta aplicación utiliza imágenes del proyecto Open Street Maps y la biblioteca JXMapKit para desplegar un mapa indicando la posición geográfica del vehículo, como se observa en la figura 2.



**Figura 2.** Interfaz de usuario de la aplicación ICARO-VANET

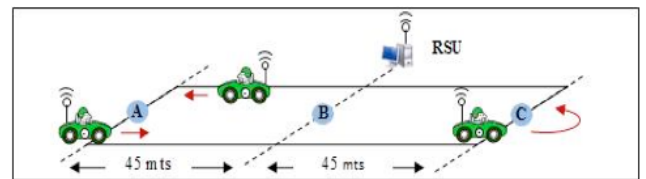
Se realizaron dos tipos de pruebas sobre el dispositivo: pruebas fijas y de movilidad. En todas las pruebas se utilizó el canal 178, correspondiente a la frecuencia 5,89 GHz de la banda IEEE 802.11p, a una tasa de transmisión de 6 Mbps. Adicionalmente, las interfaces de red usadas en las pruebas se configuraron en modo Ad-Hoc.

Con las pruebas fijas se comprobó el camino que sigue un mensaje desde el origen al destino (funcionamiento del protocolo de enrutamiento), utilizando las topologías planteadas en la figura 3, donde cada nodo tiene asignada una coordenada de posición (latitud y longitud).



**Figura 3.** Topologías de red planteadas en las pruebas fijas

Con las pruebas de movilidad se evaluó el funcionamiento del equipo en un ambiente real, donde la velocidad, distancia y otros factores pueden afectar la transmisión de los mensajes. Las pruebas de movilidad consistieron en enviar mensajes de accidente y/o congestión desde una OBU ubicada en un vehículo en movimiento, a una RSU ubicada en un lugar fijo, desde tres puntos distintos (A, B y C), como se observa en la figura 4. Esto se realizó de forma independiente a velocidades de 20 Km/h, 40 Km/h y 55 Km/h. En cada caso se enviaron veinte y cuatro (24) mensajes. Paralelamente se enviaron mensajes ICMPv6 mediante un ping6 sostenido que finalizó luego de enviar el último mensaje de accidente y/o congestión con la aplicación ICARO-VANET, esto con el objeto de determinar el desempeño de la red en función del número de paquetes perdidos.



**Figura 4.** Escenarios para las pruebas de movilidad

Una vez efectuadas las pruebas fijas, se analizaron las capturas realizadas con la herramienta Wireshark en las interfaces de red de cada nodo. El análisis reveló que los mensajes enviados en las pruebas fijas llegan con éxito desde el origen al destino, siguiendo la ruta deseada para cada topología. En la topología 1, los mensajes ICMPv6 parten de OBU3 y llegan a OBU1 luego de atravesar OBU2. En la topología 2, los mensajes enviados desde el origen (OBU1) pasan por los nodos intermedios (OBU2 y OBU3) hasta llegar al destino (OBU4). En la topología 3, los mensajes enviados desde OBU1 a OBU4 pasan por OBU2, que es el nodo intermedio más cercano a OBU4 de acuerdo a su posición (latitud y longitud).

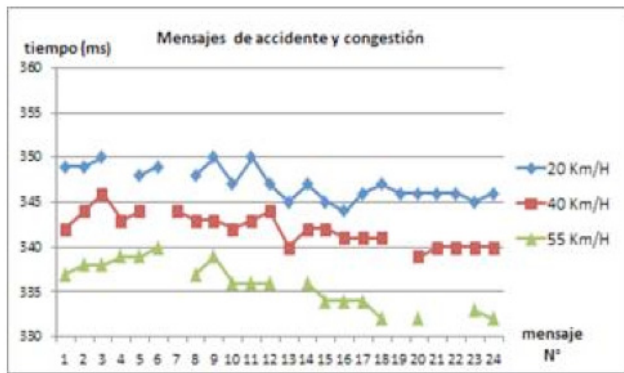


Figura 5. Tiempo que tardan en llegar los mensajes de accidente y congestión

En cuanto a las pruebas de movilidad, de los 72 mensajes enviados se pierden 9, distribuidos de la siguiente forma: 2 a 20Km/H, 2 a 40 Km/H, y 5 a 55Km/H. En la figura 5 se muestra una gráfica del tiempo que tarda cada mensaje en llegar desde la OBU a la RSU, donde los espacios en blanco corresponden a los mensajes perdidos.

#### Análisis de los protocolos de enrutamiento

Una vez estudiados los protocolos de enrutamiento para VANETs (Puello, 2012) se escogieron dos protocolos reactivos, AODV y DSR y tres protocolos proactivos DSVD, FSR y OLSR, descritos anteriormente. Estos protocolos se evaluaron usando las siguientes herramientas: NS-2 (Network Simulator 2, s.f.) para realizar las simulaciones, MOVE (MOVE (Mobility Model Generator for Vehicular Networks): Rapid Generation of Realistic Simulation for VANET,2007) para la creación de flujos de vehículos aleatorios y SUMO (Krajzewicz y Rossel, 2007) para generar las trazas de movimiento de los vehículos. Aunque hubiese sido conveniente utilizar la distribución estadística de las velocidades del tráfico generadas a partir del estudio realizado en (Bottini, Villapol, Arismendi & Mendoza, 2014), no se pudo hacer uso de estos resultados porque los mismos no fueron suficientes para obtener una distribución estable.

Para realizar la simulación se diseñó un mapa comprendido entre sectores de La Castellana, pasando por Altamira hasta Los Palos Grandes en la ciudad de Caracas, Venezuela, por donde circulan las unidades de transporte público TransChacao. Cada unidad cubre una ruta de aproximadamente 2 km. Se analizaron los protocolos en varios escenarios de tráfico: alto, medio y bajo. Para

representar el flujo de tráfico alto se colocaron 250 vehículos en el área considerada en la simulación, mientras que con el medio se colocaron 150 vehículos y para el bajo 75 vehículos. Cada vehículo viaja a una velocidad promedio de 40 km/h. Se generaron flujos de información FTP funcionando sobre TCP y tráfico de Tasa de Bit Constante (Constant Bit Rate, CBR) sobre UDP. Las métricas de desempeño utilizadas fueron: *throughput* y retardo de extremo a extremo. Se enviaron paquetes de 1000 bytes durante un intervalo de 1000 msg.

En redes VANETs es posible utilizar el estándar IEEE 802.11b como el 802.11p para el intercambio de datos (Bilgin, B. & Gungor, C., 2013). En la presente investigación se utilizó una red 802.11b, tomando en cuenta que las implementaciones del estándar IEEE 802.11p para el simulador NS-2 no eran estables para la fecha de implementación y desarrollo de las pruebas. Sin embargo; utilizando los resultados obtenidos de la investigación realizadas por (Bilgin, B. & Gungor, C., 2013), donde un análisis de rendimiento en ambientes urbanos y rurales entre los estándares previamente mencionados es realizado, es posible realizar una extrapolación de los resultados obtenidos (IEEE 802.11b) hacia el estándar IEEE 802.11p.

Las figuras 6 y 7 muestran los resultados para el tráfico TCP. Como se puede observar en la figura 6, el *throughput* disminuye a medida que el tráfico vehicular disminuye, esto debido a la merma en la cantidad de vehículos intermedios adyacentes requeridos para la entrega de paquetes entre dos vehículos. En cualquier caso AODV es el protocolo de enrutamiento a través del cual se puede alcanzar un mayor rendimiento.

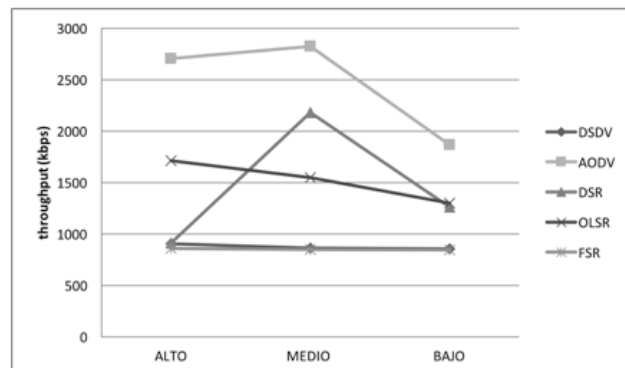
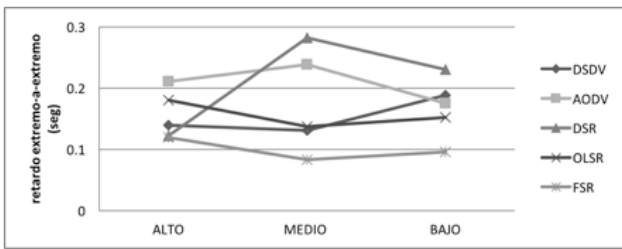


Figura 6. Throughput obtenido por protocolo de enrutamiento según el volumen de tráfico vehicular para el flujo FTP/TCP

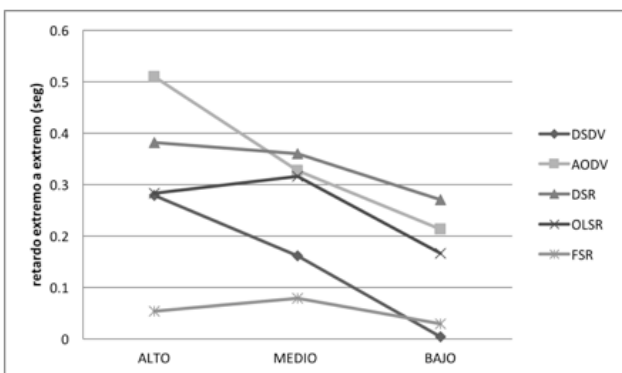




**Figura 7.** Retardo extremo a extremo obtenido por protocolo de enrutamiento según el volumen de tráfico vehicular para el flujo FTP/TCP

En la figura 7 se observa que al utilizar los protocolos proactivos - DSDV, FSR y OLSR - se obtiene un menor retardo de extremo a extremo, esto debido a que estos protocolos calculan las rutas con anterioridad. En particular se puede notar que con FSR se obtienen valores de retardo menores en hasta un 100% con respecto a los demás.

En la figura 8 se muestran los resultados de retardo extremo a extremo para el tráfico UDP. Se puede observar que el retardo de extremo a extremo experimentado por los paquetes que viajan en la red es alto para la mayoría de los protocolos llegando a medio segundo en el caso del tráfico vehicular alto usando AODV. FSR se comporta mejor que los otros protocolos, proporcionando un retardo estable, independientemente del flujo de tráfico vehicular, por debajo de 0,1 seg.



**Figura 8.** Retardo extremo a extremo obtenido por protocolo de enrutamiento según el volumen de tráfico vehicular para el flujo CBR/UDP

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un estudio detallado tendiente a establecer un prototipo de un sistema de comunicación inter vehicular para el transporte vehicular de la ciudad de Caracas. Entre los aportes de éste se encuentra la aplicación de una metodología para la caracterización

del tráfico vehicular de la ciudad y el desarrollo de una herramienta para capturar los datos con poca intervención manual.

Se desarrolló un prototipo funcional que puede ser tomado como base para el desarrollo de un dispositivo que pueda ser utilizado en las unidades de transporte, cuya característica principal es que ha sido diseñado y probado en el país, y puede ser adaptado fácilmente a las necesidades de las unidades de transporte público de Caracas; es decir, puede soportar diversas aplicaciones para el conductor de las unidades, y se le pueden instalar diversos protocolos de enrutamiento para VANETs.

A nivel de los protocolos de enrutamiento, se puede concluir que para aplicaciones destinadas al intercambio de mensajes cortos, tales como los de alertas, sería mejor el uso de un protocolo de enrutamiento proactivo, como por ejemplo FSR, ya que estos ofrecen mejores prestaciones en cuanto al retardo de extremo a extremo. Sin embargo, si la aplicación vehicular requiere el envío de un alto volumen de información, requiriéndose un alto throughput, sería mejor utilizar un protocolo reactivo, tal como AODV. Los resultados demuestran que los protocolos de enrutamiento estudiados no se comportan bien cuando se trata de tráfico CBR sobre UDP.

Entre los trabajos futuros que se pueden llevar a cabo a partir de esta investigación se encuentra la implantación de este sistema en la ciudad de Caracas, la realización de un análisis de los protocolos de enrutamiento sobre redes 802.11p y la extensión del estudio a otros protocolos de enrutamiento que puedan comportarse mejor con tráfico de paquetes CBR.

## 6. RECONOCIMIENTO

Este trabajo fue desarrollado con la ayuda financiera del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH) de la Universidad Central de Venezuela (UCV) como parte del proyecto No PG-03-8226-2011/1.

## REFERENCIAS

- ABDALLA G., ABU-RGHEFF M. & SENOUCI SM (2007). Current Trends in Vehicular Ad-Hoc Networks, International Workshop UBIROADS'2007, Marrakech, 6 July.
- BOTTINI A., VILLAPOL M.E., ARISMENDI J. Y MENDOZA G. (2014). Caracterización Estadística de la Velocidad del Tráfico de Vehículos de Transporte Colectivo de Caracas. Actas del III Simposio Científico y Tecnológico

- en Computación (SCTC 2014), 14-16 de Mayo 2014, Caracas, Venezuela.
- BILGIN, B. & GUNGOR, C., Performance Comparison of IEEE 802.11p and IEEE 802.11b for Vehicle-to-Vehicle Communications in Highway, Rural, and Urban Areas, Hindawi Publishing Corporation, International Journal of Vehicular Technology, Volume 2013, Article ID 971684, 2013.
- CELTIE Telecommunications Solutions (s.f.). CARLINK Wireless Traffic Service Platform for Linking Cars, Recuperado el 2 de septiembre de 2014, en: <http://carlink.lcc.uma.es/index.html>.
- CLAUSEN T. AND JACQUET P (2003). Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). IETF, RFC3626, October.
- DE JONGH J. (2011). GDCD Communication Stack - Building and installing the CALM FAST router.
- GERLA M, HONG X AND PEI G. (2002). Fisheye State Routing Protocol (FSR) for Ad-Hoc Networks. IETF, Internet Draft, June.
- GROOVENET: VEHICULAR NETWORK VIRTUALIZATION PLATFORM (s.f.). Recuperado el 10 de junio de 2013, en <http://www.seas.upenn.edu/~rahulm/Research/GrooveNet/>.
- HARTENSTEIN, HANNES AND LABERTEAUX, KENNETH P (2008). A Tutorial Survey on Vehicular Ad-Hoc Networks. IEEE Communications Magazine, June, 164-171.
- IEEE (2007). 802.11p-2010 - IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments, July.
- JOHNSON D., HU Y. & MALTZ D. (2007). The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad-Hoc Networks for IPv4. IETF RFC 4728, February.
- KRAJZEWICZ D AND, ROSSEL C. (2007). Simulation of Urban Mobility (SUMO). German Aerospace Centre. Recuperado el 11 de diciembre 2014, en <http://sumo.sourceforge.net/index.shtml>.
- LANG D. (2003). A comprehensive overview about selected Ad-hoc Networking Routing Protocols. Master's thesis, Technische Universit at Munchen.
- Network Simulator 2 (s.f.). Recuperado el 10 de junio de 2014, en <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
- MORENO J. Y HERRERA J. (2012). Propuesta de Desarrollo de un Dispositivo que Soporte Comunicación entre Vehículos conectados vía una VANET. Reporte Interno, Escuela de Computación, Universidad Central de Venezuela, Junio.
- MOVE (Mobility model generator for Vehicular networks): Rapid Generation of Realistic Simulation for VANET (2007). Recuperado el 11 de diciembre 2014, en: <http://lens1.csie.ncku.edu.tw/MOVE/index.htm>
- PERKINS C., BELDING-ROYER E. AND DAS S. (2003). Ad-Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. IETF, RFC 3561, July.
- PUELLO C. (2012). Estudio de los Protocolos de Enrutamiento en Redes Vehiculares Ad-Hoc. Reporte Interno, Escuela de Computación, Universidad Central de Venezuela, Abril.
- SEDE M., LI X., LI D. & WU M-Y (2008). Routing in Large-Scale Buses Ad-Hoc Networks. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2008. 2711 – 2716.
- THOURAYA T., MANABU T., THIERRY E. & LAMJED B. (2011). Experimental evaluation of an open source implementation of IPv6 GeoNetworking in VANETs. Proceedings of ITST 2011: 11th International Conference on Intelligent Transport System Telecommunications, August.
- VEHICLE INFORMATION AND COMMUNICATION SYSTEM (VICS) (s.f.), Recuperado el 2 de septiembre de 2014, en <http://www.vics.or.jp/english/vics/index.html>.
- VISUAL SENSE / PTOLEMY II. Recuperado el 10 de junio de 2014, en <http://ptolemy.eecs.berkeley.edu/visualsense>.
- WAHARTE S., BOUTABA R., IRAQI Y., ISHIBASHI B. (2006). Routing protocols in wireless mesh networks: challenges and design considerations. Multimedia tools and Applications, 29(3), 285-303.
- ZEADALLY, S., HUNT, R., CHEN, Y. S., IRWIN, A., & HASSAN, A. (2012). Vehicular Ad-Hoc networks (VANETS): status, results, and challenges. Telecommunication Systems, 50(4), 217-241.