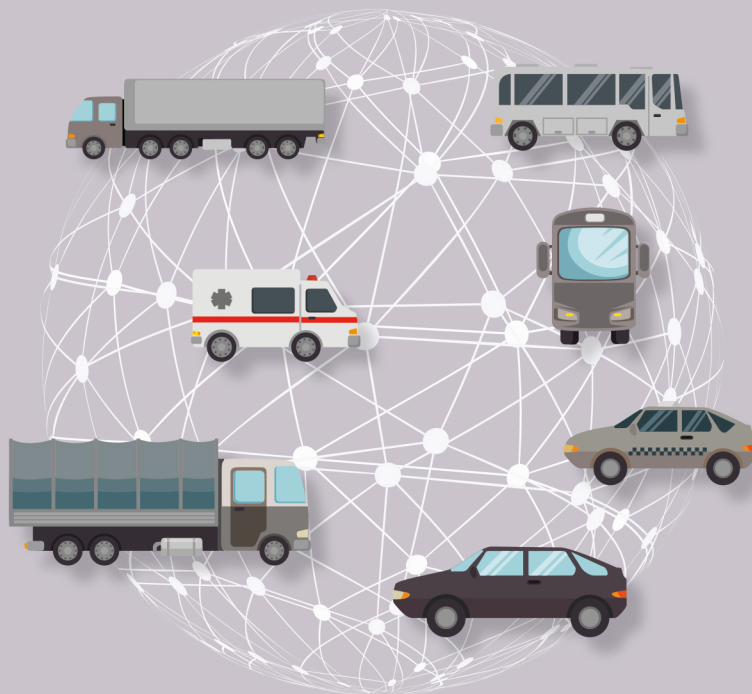


---

# REDES VEHICULARES: SERVICIOS, OPORTUNIDADES Y RETOS

---

Carolina Tripp Barba  
José Alfonso Aguilar Calderón  
[coordinadores]



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA





## REDES VEHICULARES: SERVICIOS, OPORTUNIDADES Y RETOS



# REDES VEHICULARES: SERVICIOS, OPORTUNIDADES Y RETOS

Carolina Tripp Barba  
José Alfonso Aguilar Calderón  
(coordinadores)



UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
MÉXICO, 2020

Este libro fue evaluado por pares académicos a solicitud del Consejo Editorial de la Universidad Autónoma de Sinaloa, según se establece en el Reglamento de la Dirección de Editorial, entidad que resguarda los dictámenes correspondientes.



Primera edición: 2020

D.R. © CAROLINA TRIPP BARBA

D.R. © JOSÉ ALFONSO AGUILAR CALDERÓN  
(coordinadores)

D.R. © UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA  
Blvd. Miguel Tamayo Espinoza de los Monteros 2358,  
Desarrollo Urbano 3 Ríos, 80020, Culiacán de Rosales,  
Sinaloa  
[www.uas.edu.mx](http://www.uas.edu.mx)  
DIRECCIÓN DE EDITORIAL  
<http://editorial.uas.edu.mx>

D.R. © UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
[www.upc.edu/es](http://www.upc.edu/es)

ISBN UAS: 978-607-737-292-9

ISBN UPC: 978-84-9880-829-2

Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Impreso y hecho en México

# Índice

Prólogo .....	9
<i>Mónica Aguilar Igartua</i> <i>Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona, España</i>	
Introducción .....	11
La importancia de los protocolos de encaminamiento en los servicios orientados a redes vehiculares .....	15
<i>Carolina Tripp Barba</i> <i>Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS), México</i>	
Difusión multisalto de mensajes en redes vehiculares .....	37
<i>Estrella García Lozano, Celeste Campo, Carlos García Rubio</i> <i>Universidad Carlos III de Madrid (UC3M), España</i>	
Simulación de una VANET como solución al tráfico vehicular de la ciudad de Quito .....	63
<i>Daniel Caiza, Christian Tipantuña, Martha Cecilia Paredes Paredes</i> <i>Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito, Ecuador</i>	
Análisis de métricas de centralidad en diferentes modelos de movilidad vehicular para el plano urbano de la ciudad de Quito .....	95
<i>Luis F. Urquiza Aguilar, Cristian O. Rodríguez Santiago, Xavier Calderón Hinojosa</i> <i>Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito, Ecuador</i>	

SDN: solución a los retos que enfrenta IoT . . . . . 117  
*Juan Felipe Botero Vega, Natalia Gaviria, Lina M. Hincapié*  
*Universidad de Antioquia, Colombia*

Actualidad de las redes vehiculares: vehículos autónomos . . . . . 139  
*Leticia Lemus Cárdenas, Nely Patricia López Márquez, Mónica Aguilar Igartua*  
*Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona, España*

Actualidad de las redes vehiculares: vehículos eléctricos  
y red inteligente . . . . . 151  
*Nely Patricia López Márquez, Leticia Lemus Cárdenas, Mónica Aguilar Igartua*  
*Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona, España*

Sobre los autores . . . . . 193

# Prólogo

| MÓNICA AGUILAR IGARTUA

| UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA (UPC), BARCELONA, ESPAÑA

En los últimos años hemos estado viviendo una importante revolución en el campo de los vehículos denominados inteligentes, los cuales tienen la capacidad de comunicarse entre sí y con la infraestructura de la ciudad y de las carreteras. El desarrollo de las redes vehiculares involucra a diversos actores, como científicos que focalizan su investigación en el perfeccionamiento de la tecnología implicada, fabricantes de automóviles que ven interesantes oportunidades de diseño y mejora de sus vehículos, gobiernos que identifican una ocasión de reducir la siniestralidad en las carreteras y los índices de contaminación en las ciudades, además de los conductores y ciudadanos cuya seguridad vial y calidad de vida puede mejorar sustancialmente.

Los Sistemas de Transporte Inteligente (ITS, *Intelligent Transportation System*) engloban a vehículos con capacidad de comunicación, así como a otros dispositivos de comunicación que forman parte de la Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*). Estos permiten desarrollar multitud de interesantes servicios para mejorar la seguridad en las carreteras, gestionar la fluidez del tráfico en las ciudades, administrar eficientemente los aparcamientos e informar a los conductores del estado del tráfico en tiempo real, entre otros provechosos e interesantes servicios.

Las redes vehiculares *ad hoc* (VANET) ofrecen un gran potencial para el desarrollo de aplicaciones enfocadas en mejorar la seguridad en el tráfico. La interacción entre los vehículos y la infraestructura permiten una comunicación en tiempo real para recoger datos del estado del tráfico y sobre posibles incidentes ocurridos en la vía. Además, las VANET ofrecen que un vehículo accidentado pueda mandar mensajes de alerta a los coches cercanos de forma inmediata. De este modo, se puede informar a los conductores sobre situaciones peligrosas y evitar otros posibles incidentes.

El vehículo autónomo (VA) sin conductor empieza a proyectarse como parte del tráfico en un futuro próximo en las ciudades inteligentes, lo que aportaría prometedores beneficios a la mejora de la movilidad y la reducción de accidentes. La industria del VA, que incluye tanto comunicaciones como automoción, atrae empresas de ambos sectores. En entornos complejos, como son las ciudades, aparecen interesantes desafíos que pueden solucionarse con el uso de algoritmos basados en la inteligencia artificial para lograr que el vehículo se desplace eficientemente.

Por otro lado, la incorporación masiva del vehículo eléctrico (VE) puede ser un cambio fundamental en los modelos de movilidad de nuestras ciudades. Asimismo, el VE supone una interesante oportunidad para optimizar una gestión global del sistema eléctrico de forma eficiente, reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y conseguir ciudades sostenibles que disminuyan su dependencia energética del exterior.

Este libro provee una visión general de las redes vehiculares *ad hoc*, describe sus conceptos fundamentales, la tecnología implicada que permite la comunicación entre vehículos y con la infraestructura, y las principales aplicaciones que podrán ser desplegadas. Incluye una descripción de las más novedosas propuestas de protocolos de encaminamiento y de diseminación de mensajes en redes VANET. Presenta casos de aplicación en una gran ciudad como Quito, Ecuador. También incluye un estudio sobre la Internet de las Cosas, las redes definidas por *software* y su relación con las redes vehiculares. Finalmente, muestra la novedad de las redes vehiculares, incluyendo coches autónomos y eléctricos, así como analiza interesantes evaluaciones de prestaciones mediante simuladores VANET.

# Introducción

Recientemente, como una visión a futuro del desarrollo urbano, las ciudades inteligentes (*Smart Cities*) han ganado la atención tanto de la academia como de la industria. En particular, con la incorporación de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC), las ciudades inteligentes pueden ofrecer una gran cantidad de servicios para las personas (por ejemplo, estacionamientos, planeación de rutas, gestión automática de semáforos). Sin embargo, para lograr este objetivo hay muchos aspectos a considerar. Por ejemplo, desde la perspectiva de los datos, existe una gran variedad de información generada por las ciudades que necesita ser recolectada, guardada de manera segura y procesada eficientemente. Por otro lado, con las tecnologías computacionales emergentes (como el cómputo social, el cómputo en la nube, Internet de las Cosas, etcétera.) deben tenerse en cuenta nuevos paradigmas relacionados con las ciudades inteligentes.

La rápida evolución de las tecnologías de comunicaciones, junto con la variedad y la disponibilidad potencial de los proveedores de servicios y medios de acceso a la red, ha llevado a la aparición de los Sistemas de Transporte Inteligente (ITS). Existe una gran diversidad de redes ITS, donde las más popularizadas en la actualidad son las redes vehiculares *ad hoc* (VANET, *Vehicular Ad-hoc Network*). Esta es un tipo de red ITS donde un vehículo es un automóvil conectado inalámbricamente y equipado con diversas tecnologías de comunicación.

Con base en este contexto, los trabajos que se exponen aquí dan a conocer los avances de algunas investigaciones realizadas hasta el momento en varias universidades del país y de Iberoamérica.

En el primer capítulo, Carolina Tripp Barba explica cómo las redes vehiculares o *Vehicular Ad-hoc Networks* (VANET) han llegado a ser una tecnología con una gran atención en años recientes y cómo los protocolos de encamina-

miento diseñados para estas redes se enfocan en ofrecer seguridad a los conductores, regular el tránsito vehicular y mejorar, en general, la experiencia al transportarse. Sin embargo, señala que los protocolos diseñados para una red móvil (MANET, *Mobile ad-hoc Network*) no son eficientes en una VANET, por lo que constantemente se realizan aportaciones investigativas en esta área, enfocadas en mejorar el comportamiento de los protocolos de encaminamiento en redes vehiculares. Por lo tanto, en este capítulo se analizan algunos de los protocolos más utilizados en este tipo de red, su clasificación y cuál es su papel dentro de las diferentes aplicaciones de una VANET.

En el segundo capítulo, Estrella García Lozano, Celeste Campo y Carlos García Rubio exponen cómo la difusión multisalto de mensajes en redes vehiculares es un reto muy importante que permitirá el despliegue de diversos servicios en estas redes. Detallan cómo estos servicios pueden ser alertas de seguridad, notificaciones de eventos en ciudades inteligentes o difusión de ofertas de servicios en carretera, como gasolineras y restaurantes. Asimismo, su investigación explica que el problema de la difusión eficiente de mensajes en estos entornos es complejo, pero que en los últimos años se han desarrollado diversas soluciones, en la mayoría de los casos, adaptadas a dos escenarios diferenciados: por un lado, entornos de carretera o interurbanos, y por el otro, entornos urbanos. De igual modo, estudian las propuestas más relevantes en entornos de carretera y trazan cuáles van a ser los retos a corto plazo.

Por su parte, Daniel Caiza, Christian Tipantuña y Martha Cecilia Paredes Paredes, en «Simulación de una VANET como solución al tráfico vehicular de la ciudad de Quito» abordan que uno de los puntos más críticos de la ciudad ecuatoriana es la movilidad vehicular de su centro histórico, la cual llega a ser insoportable sobre todo en horas pico, afectando la calidad de vida de los ciudadanos. Una alternativa para mejorar el tráfico vehicular en el centro urbano es el uso de una red vehicular *ad hoc*, y por ello se realiza una simulación de una VANET para un área del centro histórico a fin de determinar si la red ayudará a solucionar los problemas asociados con el tráfico. Para la simulación se utiliza Veins, que vincula un entorno de movilidad generado en SUMO, con un ambiente que emula la comunicación de los dispositivos de red mediante OMNET++. Este trabajo no pretende ser un manual práctico de Veins, sino resaltar la utilización de una VANET como una herramienta idónea y no agresiva para solucionar problemas de tráfico en un área urbana.

El cuarto capítulo, «Análisis de métricas de centralidad en diferentes modelos de movilidad vehicular para el plano urbano de la ciudad de Quito», elaborado por Luis F. Urquiza Aguiar, Cristian O. Rodríguez Santiago, Xavier

Calderón Hinojosa, plantea las métricas de centralidad como una herramienta de análisis para describir la conectividad de una red. Estas métricas fueron utilizadas para estudiar una red vehicular *ad hoc* en una zona de alta concurrencia en la ciudad de Quito, variando la cantidad de vehículos y utilizando los modelos de movilidad IDM y Krauss. Además, se realiza un análisis comparativo entre escenarios optimistas en los que no existe atenuación de señal debido a edificios y escenarios realistas que consideran la presencia de ellos en la topología de la ciudad. Los resultados indican que existen diferencias significativas entre ambos escenarios (ideal y realista). Por otro lado, los modelos de movilidad no impactan de manera significativa en los resultados obtenidos para ninguno de los casos. Finalmente, a medida que la densidad de nodos en el área aumenta, los resultados entre los dos modelos de movilidad convergen hacia los mismos valores.

En el capítulo «SDN: solución a los retos que enfrenta IoT», elaborado por Juan F. Botero, Natalia Gaviria, Lina M. Hincapié, se muestra como Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*) ha ganado mucho auge en los últimos años, tanto por los beneficios que se espera traiga su implementación como por los nuevos dispositivos inteligentes y tecnologías inalámbricas que se han desarrollado. Se prevé que el incremento de dispositivos IoT continúe con un crecimiento exponencial; sin embargo, para que el despliegue de redes IoT se haga una realidad, se deben solventar ciertos desafíos, como la gestión y el control de redes muy grandes y complejas. Frente a estos desafíos, las Redes Definidas por *Software* (SDN, *Software Defined Networks*) se han considerado como la mejor alternativa para superar la problemática de gestión mencionada, ya que SDN separa el plano de control del plano de datos y permite que haya un control lógico centralizado de la red, facilitando la gestión de redes grandes y complejas, como el caso de las redes IoT. Puesto que las redes IoT son inalámbricas, se han realizado varios desarrollos, como OpenRadio, OpenRoad, y Odin, entre otros, que habilitan las características de SDN en este tipo de redes. De este modo, se puede llevar a cabo la integración de SDN e IoT, lo cual presenta múltiples ventajas para un aprovechamiento máximo de las funcionalidades que ofrece IoT y posee muchas aplicaciones en cuanto al despliegue de entornos inteligentes, tales como el monitoreo urbano, el cuidado de la salud, los hogares y demás.

En el sexto capítulo, «Actualidad de las redes vehiculares: vehículos autónomos», las investigadoras Leticia Lemus, Nely Patricia López Márquez y Mónica Aguilar Igartua muestran un breve estado del desarrollo e implementación de los Vehículos Autónomos (AVs, *Autonomous Vehicles*), que desde hace pocos

años se han convertido en uno de los temas más controversiales de desarrollo tecnológico que comprende el Sistema Inteligente de Transporte (ITS) y su integración en las ciudades inteligentes. Las compañías automotrices, investigadores y distintas instancias de gobierno en el mundo han unido esfuerzos en el diseño de esta tecnología para que sea una realidad lo más pronto posible. Sin embargo, para llevar al mundo real el uso de la conducción autónoma, primero se deberá someter y validar por distintas pruebas que permitan asegurar que es posible utilizarla sin ningún riesgo para los usuarios y su entorno. Los AVS involucran muchas técnicas para lograr las capacidades tradicionales de los vehículos y, a su vez, para funcionar sin la intervención humana para la conducción. El enfoque principal en las pruebas de los vehículos autónomos se centra en su respuesta ante la percepción de obstáculos y señales, toma de decisiones en función de la información procesada, nivel de inteligencia (predicción) y seguimiento de trayectorias.

Finalmente, Nely Patricia López Márquez, Leticia Lemus y Mónica Aguilar Igartua, en «Vehículos eléctricos y redes inteligentes» muestran que la electrificación del transporte es considerada como una de las soluciones a desafíos como el calentamiento global, la sostenibilidad y las preocupaciones sobre la disponibilidad de combustible, obteniendo provecho de energías renovables como la eólica y la solar. El potencial de integración de vehículos eléctricos en redes inteligentes está teniendo notable atención dentro del mercado en torno a empresas comerciales y, a su vez, en el ámbito de la comunidad científica. En algunos países más desarrollados, la integración de la red y los vehículos eléctricos ya están disponibles en el mercado. Sin embargo, su adopción se encuentra en una etapa temprana de penetración. Las tendencias del mercado muestran un entorno activo en el que se establecen nuevas asociaciones entre las empresas de servicios públicos de electricidad y los proveedores de servicios de vehículos eléctricos. La implementación en el mercado de vehículos eléctricos necesita una preparación preliminar del entorno; es esencial actualizar redes de electricidad e instalar estaciones de carga públicas. Por tanto, el inminente crecimiento de la cuota de mercado de este tipo de vehículos implica desafíos comerciales y técnicos donde la gestión de estos como recursos distribuidos se acopla al paradigma de redes inteligentes.

# La importancia de los protocolos de encaminamiento en los servicios orientados a redes vehiculares

| CAROLINA TRIPP BARBA\*

| UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA (UAS), MÉXICO

## INTRODUCCIÓN

La tecnología tiene éxito cuando proporciona beneficios a la sociedad directa o indirectamente. Comprender el impacto social y económico, así como los aspectos centrados en el ser humano de un sistema o tecnología inteligente y diseñar una estructura con potenciales servicios de valor añadido ayudan a estimular los descubrimientos de nuevas herramientas, metodologías y productos innovadores. La constante movilidad de las personas y su creciente necesidad de estar conectadas han dado pie a nuevas áreas de investigación, como las redes vehiculares. El gran número de automóviles que actualmente circulan por carreteras y los grandes avances en las comunicaciones inalámbricas han hecho de las redes vehiculares o *Vehicular ad hoc Networks* (VANET) (Olariu y Weigle, 2009; Hartenstein y Laberteaux, 2010) (Olariu y Weigle, 2009; Hartenstein y Laberteaux, 2010) un asunto de gran interés.

La conexión inalámbrica vehicular se espera que sea el pilar de una sociedad inteligente y una nueva manera de analizar cómo los conductores deciden sus rutas. Utilizar tecnologías de comunicación móvil integradas en los automóviles es la clave para conectar vehículos, infraestructuras (antenas) y pasajeros. El uso generalizado de coches conectados genera altos volúmenes de datos relacionados con el transporte, permitiendo una amplia cantidad de nuevas aplicaciones en este sector de la industria (CISCO VNI, 2017).

Un sistema de transporte inteligente (ITS, *Intelligent Transportation System*) tiene como objetivo mejorar la eficiencia y la seguridad de los viajes mediante la consolidación de las operaciones de los vehículos, la gestión del tráfico y la

\* Correo electrónico: ctrippp@uas.edu.mx.

ayuda a los conductores con mensajes de alerta y seguridad. Las VANET serán el medio para proporcionar la información actualizada y dinámica sobre las condiciones de la carretera de modo que el número de accidentes se pueda minimizar. Los vehículos podrán recopilar, transmitir e interpretar la información a través de una amplia gama de sensores, recursos informáticos y de comunicación, y por lo tanto, ayudarán en el cómputo y adquisición de datos y facilitarán a los conductores la toma de decisiones apropiadas.

Tan solo en la Ciudad de México, según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en diciembre de 2006 había 16 368 255 vehículos de motor registrados. En el mismo mes pero de 2016, esta cifra incrementó a 27 445 198 vehículos, lo cual es un ejemplo de cómo ha aumentado el parque vehicular (INEGI, 2017).

Una VANET permite a un grupo de nodos móviles formar una conexión temporal sin la necesidad de una infraestructura central, con la diferencia que los nodos son vehículos que se mueven siguiendo los caminos definidos, es decir, las calles o carreteras. Esta red se caracteriza por una conectividad intermitente y rápidos cambios en su topología por la velocidad que pueden alcanzar los nodos que la conforman, y por lo tanto, estos tienen pocos segundos para comunicarse entre ellos y con puntos de acceso a lo largo de las carreteras. En contraste con otro tipo de redes *ad hoc*, estas además siguen patrones de movilidad muy específicos. Por todo lo anterior, este entorno de comunicación presenta altos niveles de pérdida de paquetes, haciendo evidente la importancia de un protocolo de encaminamiento que se adapte a estas situaciones y considere las características específicas de la red y el tipo de servicio o aplicación que se desea ofrecer.

Una VANET permite dos tipos de enlaces *Vehículo-a-Vehículo* (V2V), donde la conexión se da directamente entre los nodos que conforman la red y *Vehículo-a-Infraestructura* (V2I), donde la comunicación amplía coberturas al permitir el intercambio de información con algún tipo de infraestructura fija, alojada a lo largo de las carreteras. Entre los retos principales identificados en las redes vehiculares está el ofrecer seguridad vial, donde tanto el gobierno como empresas manufactureras enfocan sus esfuerzos.

## REDES AD HOC

El término *ad hoc* implica una red establecida para un servicio específico o a menudo extemporáneo adaptado a las aplicaciones. La red *ad hoc* típica se con-

figura durante un periodo limitado. Las redes *ad hoc* (Canales Pallares, 2008) son aquellas redes formadas por elementos móviles que pueden estar conectados entre sí arbitrariamente y de manera dinámica. Es decir, no hay ningún elemento fijo y la topología de red puede adoptar múltiples formas siendo igual de funcional. En este tipo de redes todos los nodos pueden funcionar como enrutadores (*routers*) reenviando los paquetes desde el nodo origen hasta el destino, y se pueden ver involucrados tanto en el descubrimiento como en el mantenimiento de rutas. Estas redes también son conocidas como redes distribuidas.

Los protocolos utilizados en este tipo de redes se adaptan a una aplicación particular; por ejemplo, envían una secuencia de video a través del campo de batalla, averiguan si un incendio forestal ha comenzado y establecen una videoconferencia entre los equipos involucrados en una misión de rescate, entre otras. Estas aplicaciones pueden ser móviles y el entorno puede cambiar dinámicamente. Por consiguiente, los protocolos *ad hoc* deben autoconfigurarse para ajustarse a los cambios en el entorno, el tráfico y el objetivo. Debido a la naturaleza móvil y a la falta de una infraestructura, una red *ad hoc* plantea nuevos requisitos de diseño.

Uno de ellos es la autoconfiguración (de dirección y de encaminamiento) frente a la movilidad. En el nivel de aplicación, los usuarios de redes *ad hoc* suelen comunicarse y colaborar (por ejemplo, policía, bomberos, equipos de personal médico) en misión de búsqueda y rescate. Por lo tanto, estas aplicaciones requieren una comunicación de grupo eficiente para datos y tráfico en tiempo real (López Márquez, 2012; Alba Cruz, 2009).

Desde hace varios años, este tipo de redes son un área de interés ampliamente investigada, gracias a lo cual se han logrado grandes avances en tecnologías como las redes móviles (MANET, *Mobile ad hoc Network*) (Perkins y Royer, 2000), redes de sensores o WSN (*Wireless Sensor Networks*) (Gómez Montenegro *et al.*, 2010) y las redes VANET o vehiculares, principalmente.

## MANET

En los últimos años, el considerable crecimiento del sector de los servicios móviles en todo el mundo ha sido, sin duda, el principal fenómeno en el ámbito de las telecomunicaciones. La tecnología inalámbrica es capaz de alcanzar prácticamente todas las ubicaciones en la superficie de la Tierra. Con tal éxito en la demanda de comunicaciones móviles, no es sorprendente que esta

tecnología haya llevado al desarrollo de nuevos servicios multimedia y a la evolución de las necesidades de los usuarios en términos de rendimiento y movilidad universal. Este tipo de comunicación ya se aplica al ámbito de la computación personal y empresarial, haciendo que evolucionen los hábitos de vida de las personas y las formas de trabajo (Labiód, 2008).

Una MANET es una colección de dispositivos inalámbricos independientes que pueden dinámicamente formar una red (Perkins y Royer, 2000). Los nodos en una MANET presentan movimientos aleatorios y son capaces de autoorganizarse y colaborar entre ellos para tener comunicaciones inalámbricas exitosas sin una infraestructura fija y control centralizado. Este entorno permitió el desarrollo de nuevas aplicaciones que no eran posibles sin una infraestructura central.

Las características destacables de este tipo de redes son (Mateos Márquez, 2012):

- *Topología de red dinámica*: debido a que los nodos que la forman son móviles, esta puede cambiar rápida e impredeciblemente y la conectividad puede estar variando de manera constante.
- *Nodos autónomos y autoconfigurables*: cada terminal es un nodo autónomo y puede funcionar como *host* o como *router* y es responsable del descubrimiento de nuevos nodos en la red para comunicarse o realizar la configuración de ella.
- *Encaminamiento multisalto*: cuando es necesaria la comunicación entre nodos que no están dentro de un rango de comunicación directa, el nodo fuente hace uso de nodos intermedios para hacer entrega de la información al destino final.
- *Limitada capacidad de procesamiento*: en la mayoría de los casos una MANET está formada por nodos que tienen una limitada capacidad de procesamiento, un tamaño de memoria reducido y baja capacidad de almacenaje. Por lo tanto, los algoritmos utilizados deben optimizar todo este tipo de funciones.

## VANET

Una VANET o red *ad hoc* vehicular (Olariu y Weigle, 2009; Hartenstein y Larterteaux, 2010; Moustafa *et al.*, 2008) es considerada un tipo específico de red MANET, con la principal diferencia que los nodos que la conforman son

vehículos. Es por esto que el gran número de aplicaciones enfocadas en los Sistemas de Inteligentes de Transporte (ITS, *Intelligent Transportation Systems*) (Dimitrakopoulos y Demestichas, 2010; Wang y Chou, 2009) ha motivado el amplio desarrollo de las redes vehiculares.

Dentro de este tipo de enlaces podemos identificar dos componentes importantes: OBU (*on-board unit*) y RSU (*roadside unit*), que pueden ser vistos como nodos de una red *ad hoc*. El OBU es un dispositivo dentro del vehículo que le permite tener la capacidad de comunicarse. Por otro lado, una RSU se puede conectar a una red de infraestructura, que a su vez puede estar enlazada a internet, lo cual permitirá ampliar la cobertura de la VANET. Las RSUs también pueden comunicarse entre sí directamente o mediante multisalto, y su función principal es la mejora de la seguridad vial, ejecutando aplicaciones especiales y enviando, recibiendo o encaminando datos del dominio *ad hoc*. La infraestructura, ya sea en la carretera o autopista, es una parte importante de los sistemas de redes vehiculares, ya que pueden usarse para ayudar en la provisión de seguridad y privacidad para las aplicaciones de VANET (Urquiza Aguiar, 2016).

Se han definido dos tipos de comunicación en las redes vehiculares: la comunicación intervehicular o Vehículo-a-Vehículo (V2V), donde los automóviles intercambian mensajes directamente, y la comunicación Vehículo-a-Infraestructura (V2I), donde los enlaces se establecen con dispositivos fijos, como peajes y puntos de acceso a internet (Orozco *et al.*, 2012). La topología en una VANET cambia constantemente debido a la constante entrada y salida de vehículos a la red, esto es, provocadas principalmente por la velocidad variable que pueden tener los nodos participantes (automóviles). Por lo tanto, los paquetes de información buscan frecuentemente rutas alternativas.

Uno de los inconvenientes en las VANET, como se mencionó anteriormente, es la velocidad de los nodos. Automóviles que circulan en la misma vía pueden frecuentemente mantener la misma velocidad y el enlace de comunicación por un periodo más largo; por el contrario, cuando tienen direcciones opuestas la comunicación suele durar pocos segundos. Estas velocidades están restringidas a normas de tránsito, rutas o zona de la ciudad, lo cual permite que el comportamiento de la red pueda ser predecible en ciertas áreas. En una red vehicular es de gran importancia la fiabilidad de la información que pueda ser obtenida en tiempo real, principalmente en el caso de los servicios de emergencia que dependen de la rapidez de las notificaciones para lograr llegar en el menor tiempo posible a la ubicación de un siniestro; en el caso de los ciudadanos en general, ofrece la posibilidad de evitar zonas de congestión, accidentes o situaciones peligrosas.

A diferencia de otros entornos *ad hoc*, donde el movimiento puede ser más aleatorio, en una VANET los nodos se encuentran limitados a seguir las calles de la ciudad donde se encuentran obstáculos, como edificios, los cuales pueden bloquear o reducir la señal de comunicación.

En resumen, a continuación se describen las principales características de una VANET (Orozco Sarasti y Llano Ramírez, 2014):

- *Topología dinámica*: los nodos están en constante movimiento y el establecimiento de la comunicación (sea V2I o V2V) debe darse en un periodo corto, dificultando la identificación de la topología para estas redes.
- *Canal variable de comunicación*: debido a la velocidad de los vehículos, a los ambientes donde circulan y a los posibles obstáculos para la señal inalámbrica (edificios, árboles, etcétera), la comunicación puede sufrir variaciones en el canal de comunicación con mayor frecuencia que en otras redes móviles.
- *Autonomía*: comprende la capacidad que tiene cada nodo para acceder al medio, transmitir, enrutar y recibir paquetes cuando lo requiera, sin estar bajo la influencia de un control centralizado.
- *Energía ilimitada*: los vehículos no tienen restricciones en el consumo de energía, dado que su batería proporciona una cantidad suficiente para su operación.
- *Alta capacidad computacional*: los nodos manejan, dependiendo de la aplicación, elevados flujos de tráfico de red con baja prioridad (p. ej. *streaming* de video) o bajas tasas de datos con alta prioridad (p. ej. seguridad vial o emergencias). Además, controlan el enrutamiento y la conexión con las RSU, por lo que los dispositivos requieren capacidad computacional para realizar las tareas mencionadas, en algunos casos simultáneamente (en especial las aplicaciones críticas).

Las redes vehiculares buscan ofrecer una forma de transporte eficiente en calles y carreteras, así como hacerlas más seguras y confortables para conductores y pasajeros.

## PROTOCOLOS DE ENCAMINAMIENTO

Uno de los campos más prometedores de las comunicaciones inalámbricas es la red vehicular *ad hoc*, la cual puede considerarse una aproximación a un

Sistema de Transporte Inteligente. El diseño de protocolos de enrutamiento en VANET es crucial en el soporte de los ITS. Como requisito previo para la comunicación, estos protocolos deben establecer una ruta eficiente entre los nodos que la forman. En la actualidad existe una gran cantidad de publicaciones sobre técnicas de enrutamiento, las cuales ofrecen una estrategia particular dependiendo de su aplicación.

## Clasificación

Al realizar una clasificación de los principales protocolos de encaminamiento propuestos en la literatura, pueden encontrarse diversos criterios dentro de los cuales podemos destacar los siguientes (Doumec, 2008):

- El alcance: *unicast*, *broadcast* y *multicast*.
- El modo de descubrimiento de rutas: proactivo, reactivo e híbrido.
- Según la información de localización: basados en la fuente, basados en la trayectoria y los geográficos.

Entre los protocolos basados en el alcance, podemos identificar tres grandes grupos. Los protocolos *unicast* transmiten datos de un destino a un receptor, mientras que los *multicast* envían la información a un grupo de nodos. Finalmente, los protocolos *broadcast* transfieren la información a todos los nodos dentro de su área de cobertura.

Considerando su modo de descubrimiento de rutas, los protocolos pueden ser *proactivos*, es decir, aquellos que buscan en todo momento establecer un camino e independientemente de las necesidades de encaminamiento, intentan tener conocimiento completo del estado de la red. Por otro lado, los protocolos *reactivos* solo intentan establecer una ruta de envío cuando es necesario, es decir, cuando se hace una solicitud de envío de información. Y finalmente, existen los *híbridos* que son una combinación de los dos anteriores.

Respecto a la base de su información de localización, los protocolos pueden ser *basados en la fuente*, en los cuales se incluye información completa de la ruta desde el origen en los paquetes de datos; *basados en la trayectoria*, donde los mensajes se dirigen hacia un destino utilizando trayectorias predefinidas; y los *geográficos*, que no requieren el establecimiento o mantenimiento de rutas completas, sino solo un servicio de localización para establecer la posición del destino, como un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, *Global Position System*).

## Protocolos de Encaminamiento para VANET

Las comunicaciones vehiculares son ahora el modo dominante de transferir información entre automóviles. Una VANET es una subclase de la red móvil *ad hoc* que no depende de infraestructura fija, en la que los nodos son altamente dinámicos. Por lo tanto, la topología de red cambia rápidamente provocando que los protocolos diseñados para ella deban ajustarse de manera eficiente a la topología rápidamente variable de los vehículos en movimiento.

El futuro en los Sistemas de Transporte Inteligente (Dimitrakopoulos y Demestichas, 2010; Wang y Chou, 2009) requiere una rápida y confiable comunicación entre vehículos (V2V) o entre vehículos e infraestructura (V2I). En una red *ad hoc* V2V, comunicaciones donde no se requiere una infraestructura, los nodos se notifican cuando están dentro del área de transmisión de otros, o cuando está disponible la oportunidad de realizar múltiples saltos para intercambiar datos utilizando otros vehículos en el área. Los mensajes necesitan ser encaminados desde una fuente hacia uno o diversos destinos. Las características deseables de un protocolo de encaminamiento incluyen:

- Control mínimo de *overhead*.
- Caminos libres de ciclos.
- Baja complejidad.
- La capacidad de realizar *multicast*.

Además de lo mencionado anteriormente, un entorno vehicular posee como reto principal diseñar protocolos de encaminamiento para comunicaciones V2V que considere las siguientes particularidades:

- Información de encaminamiento adaptable a la alta movilidad de la topología.
- Bajo tiempo de convergencia en los algoritmos.
- Bajo retardo en el descubrimiento de vecinos.
- Escalabilidad.

En comparación con las redes *ad hoc* inalámbricas en general, el ambiente de tránsito en los entornos de comunicación V2V consiste en vehículos no coordinados, cuyos vecinos cambian constantemente y no tienen relaciones entre sí (Chennikara-Varghese *et al.*, 2006). Los protocolos de redes móviles *ad hoc* (MANET) se enfrentan a diversos desafíos cuando se aplican a las redes

de vehículos. En una MANET, los nodos se mueven normalmente juntos como un grupo y tienen movimiento sincrónico que asegura que los nodos tengan conocimiento de los otros miembros.

Aun cuando estos protocolos funcionan bien para nodos coordinados, podría ocurrir que no funcionen bien para vehículos en una autopista donde los participantes en la red son generalmente desconocidos y no tienen ninguna relación. Por ejemplo, los protocolos diseñados para una MANET incurren en altas latencias en la configuración cuando esta trabaja con vehículos no coordinados. A medida que aumenta su movilidad, las rutas disponibles cambiarán frecuentemente, lo que conduce a un retraso aún mayor en el funcionamiento de los algoritmos de enrutamiento.

Además, la colisión y la contención de la capa MAC (*Media Access Control*) derivada del estándar IEEE 802.11 aumenta el tiempo de establecimiento de ruta y el retraso para el descubrimiento de vecinos (Chennikara-Varghese *et al.*, 2006). Esto se debe a que muchos nodos dentro de la cobertura de radio tienden a anunciar su información de enrutamiento en el mismo instante. En un entorno VANET, donde la densidad de vehículos suele ser muy alta, esto es muy frecuente. Aunado a los problemas anteriores, la escalabilidad es también un desafío, debido a que la red puede pasar de escasa a densa en muy poco tiempo. Los parámetros de otras capas, como la calidad del canal inalámbrico, la eficiencia de la batería o los requisitos específicos de la aplicación, también pueden afectar las decisiones de enrutamiento y deben tenerse en cuenta en el diseño de los protocolos. En los últimos años se han desarrollado diferentes propuestas de protocolos de enrutamiento que podrían aplicarse a las VANET. A continuación, presentamos algunos de los más destacados en la literatura, mostrando las principales características, así como sus ventajas y desventajas.

## AODV

*Ad-hoc On-demand Distance Vector* (AODV) (Perkins y Royer, 2000; Perkins, 2003; Perkins y Royer, 1999) es un protocolo reactivo que usa un vector de distancia *Bellman-Ford* para operar en un entorno móvil. Establece una ruta desde la fuente al destino solamente cuando el nodo emisor desea enviar paquetes de datos. El camino es mantenido tanto tiempo como el emisor lo necesite y siempre que exista la conectividad de los nodos de la trayectoria. El descubrimiento de rutas está basado en ciclos de consulta y respuesta de información de enlaces; estos datos son almacenados en los nodos intermedios

(entre origen y destino) a lo largo de la ruta completa, lo cual se llama *tabla de encaminamiento*.

Los paquetes de control utilizados en AODV son RREQ (*route request message*), mensaje enviado en modo *broadcast* cuando se inicia el descubrimiento de una ruta; RREP (*route reply message*) es enviado de manera *unicast* hacia el emisor, una vez localizado el destino, y RRER (*route error message*) se envía como una notificación cuando es identificada la caída de un enlace. Este protocolo ha sido ampliamente evaluado en diferentes escenarios VANET (Jaap *et al.*, 2005; Härrri *et al.*, 2006; Naumov, 2006) y se ha demostrado que no es apto en entornos con alta movilidad o baja densidad de nodos debido a su manera de establecimiento de rutas extremo a extremo.

### GPSR

*Greedy Perimeter Stateless Routing* (GPSR) (Karp y Kung, 2000) es un protocolo geográfico y uno de los primeros diseñados para VANET. Está basado en la toma de decisiones salto a salto o *hop-by-hop* desde la fuente al destino final, por lo que tomará decisiones de envío en cada salto. GPSR utiliza dos métodos para encaminar paquetes: uno es el *reenvío codicioso* (*greedy mode*), que emite datos hacia el nodo vecino más cercano al destino final, y se utiliza de forma predeterminada, y el otro es el *reenvío de perímetro* (*perimeter mode*), que se usa en caso de que el reenvío codicioso no se pueda utilizar. En el modo de perímetro, GPSR busca explotar las propiedades del ciclo de desplazamiento de la derecha para encaminar paquetes en torno a las zonas donde no se encuentra ningún nodo más cercano. El principal inconveniente de GPSR es el uso de información obsoleta para seleccionar el siguiente salto de transmisión debido a posibles inconsistencias en las tablas de vecinos o en la ubicación del destino.

### VADD

VADD (*Vehicle-Assisted Data Delivery*) (Zhao y Cao, 2006) se basa en la idea del proceso de *carrying and forwarding* (llevar y reenviar). Su objetivo es seleccionar la ruta con el menor tiempo de transmisión. Este protocolo requiere que cada vehículo conozca su propia posición, información del mapa, así como datos sobre las estadísticas de tráfico.

De esta manera, VADD sigue los siguientes principios básicos:

- Transmitir a través de canales inalámbricos tanto como sea posible.
- Si el paquete tiene que ser llevado a través de ciertos caminos, aquel con la velocidad más alta deberá ser el elegido.
- Debido a la impredecible naturaleza de las redes vehiculares *ad hoc*, no se espera que el paquete sea encaminado con éxito a lo largo de una ruta óptima preestablecida, así que su selección dinámica debe ser ejecutada durante todo el proceso que dure el reenvío de paquetes.

Cada paquete tiene tres modos de operación: *Intersection*, *StraightWay* y *Destination*, basados en la ubicación del vehículo que transporta el paquete. El más complejo y complicado es el *Intersection*, debido a la alta cantidad de decisiones que debe tomar. En este modo, el vehículo emisor determina el siguiente salto entre todos los vecinos disponibles (en una intersección) para asegurar que el paquete pase a la dirección correcta.

#### CMGR

CMGR (*Connectivity-aware Minimum-delay Geographic Routing*) (Shafiee y Leung, 2011) es un protocolo de enrutamiento para VANET, que se adapta bien a los constantes cambios en la red. Es un protocolo eficaz para redes vehiculares, ya que presenta un buen rendimiento independientemente de la situación de la topología.

Es importante saber que cuando la red es escasa, el principal desafío consiste en maximizar las posibilidades de recepción de los paquetes, y esto se hace mediante la selección de calles con alta conectividad. Por otra parte, cuando es densa y por lo tanto existe comunicación entre la mayoría de los participantes, el principal desafío en el diseño del protocolo de encaminamiento es reducir el tiempo medio de entrega (retardo), es decir, el lapso entre el envío desde el origen y la recepción en el destino final, seleccionando rutas no congestionadas que tengan un nivel suficiente de conectividad.

En CMGR, cualquier vehículo que desea establecer una trayectoria a una pasarela (*Gateway*, GW) o un punto de acceso (*Access Point*, AP) genera un paquete de descubrimiento de ruta (*Route Discovery*, RD), que incluye identificador (ID), ubicación, vector de velocidad y el tiempo de generación de mensaje; este último es enviado de manera *broadcast* por la red. Cualquiera

vehículo intermedio que recibe el mensaje RD incluye su ubicación antes de retransmitirlo. El destinatario del RD es uno de los GW en la red. Cuando cualquier vehículo intermedio recibe el RD, este compara el tiempo de generación del mensaje con el tiempo actual y descarta el paquete si el resultado supera su tiempo de vida.

Una de las principales novedades de este protocolo es su proceso de selección de trayecto, donde la conectividad de la ruta es tomada en cuenta para seleccionar la más adecuada. Por lo tanto, la densidad de las calles es evaluada constantemente para identificar dos situaciones: zonas densas y zonas poco densas. Con esto, la selección lógica de ruta se asegura que en situaciones densas se elijan trayectorias que minimicen el retardo, seleccionando una suficientemente densa pero no congestionada. En caso de las poco densas, se utiliza la idea de *carrying the packet* (mantener el paquete), para evitar el descarte y pérdida de información. Estos dos modos de operación hacen que el protocolo se adapte correctamente a las dos situaciones (denso y poco denso) en un zona urbana.

### MMOR

MMOR (*Multi-metric Opportunistic Routing*) (Chen *et al.*, 2011) es un protocolo de encaminamiento que basa la selección de siguiente salto de reenvío en un análisis oportunista de diversas métricas para establecer la trayectoria completa. Este protocolo oportunista hace que cada nodo elija salto a salto el siguiente vecino de reenvío. El nodo trabajando con este método de encaminamiento hará que la decisión esté justificada por las circunstancias actuales de la red. Los nodos vecinos recopilan información como su propia posición, la topología de la calle y el cálculo de la densidad de vecinos (nodos dentro de su área de cobertura). Cada vehículo también registra su carga de proceso de paquetes actuales, la dirección y la velocidad del movimiento. MMOR toma en cuenta diversos parámetros para elegir al siguiente candidato de reenvío de paquetes con base en las siguientes métricas:

- Distancia entre el nodo candidato y el nodo de destino.
- Carga de proceso de paquetes del nodo candidato.
- Dirección y velocidad de movimiento del nodo candidato.
- Densidad de vecinos del nodo candidato.

### A-STAR

El algoritmo A-STAR (*Anchor Based Street and Traffic Aware Routing*) fue propuesto en Seet *et al.* (2004) para la comunicación intervehicular en un área urbana y para manejar los problemas de desconexión. El protocolo utiliza mapas para calcular las intersecciones o puntos geográficos fijos para el reenvío de datos entre origen y destino, deduce la mejor ruta basada en la información de tráfico y selecciona las calles con mayor densidad de vehículos, ya que proporciona una mejor transmisión y menos retraso para un paquete viajando a lo largo de él. Esta información de tráfico se puede determinar por el número de paradas de autobús en una calle o por la medición en tiempo real de la densidad de tráfico. Trabaja con base en dos métodos: el primero se denomina mapa estadísticamente clasificado, y el segundo, mapa clasificado dinámicamente. Cuando una ruta de acceso falla, se vuelve a calcular la trayectoria de anclaje y se notifica a los vehículos que esta ruta en particular está fuera de servicio. Esta estrategia es más eficiente para un entorno urbano.

### ZRP

ZRP (*Zone Routing Protocol*) (Shafiq *et al.*, 2012; Maihöfer, 2004) es un algoritmo híbrido (es decir, reactivo y proactivo) que separa la red en grupos de nodos. Utiliza dos enfoques de encaminamiento: enrutamiento intrazona (IARP) y el enrutamiento interzona reactivo (IERP). Si un nodo envía paquetes, este verifica que en su tabla de encaminamiento se encuentre el destino dentro de la zona (esto se realiza mediante IARP); si no es así, se envía a otra área donde se comprueba si el nodo destino está allí o si se conoce una ruta para llegar a él. Si el nodo que recibió el mensaje tiene el destino en su región, envía un mensaje de respuesta al emisor, de lo contrario, difunde el mensaje entre sus vecinos mediante IERP. La comunicación entre zonas se hace por medio de los nodos periféricos. La función de estos nodos es el enrutamiento y el descubrimiento de la zona exterior.

### V-TRADE/HV-TRADE

Los protocolos *Vector-based TRACKING DETECTION* (V-TRADE) y *History-enhanced V-TRADE* (HV-TRADE) (Sun *et al.*, 2000; Haas *et al.*, 2002) organizan

los nodos en grupos, donde solo se selecciona un pequeño subconjunto de vehículos para retransmitir el mensaje (la idea básica es similar al protocolo de enrutamiento ZRP). Basados en la información de posición y movimiento, sus métodos clasifican a los vecinos en diferentes grupos de reenvío. Para cada grupo, solo se selecciona un pequeño subconjunto de vehículos (llamados fronterizos) para retransmitir el mensaje.

El primero (V-TRADE) utiliza una distancia vectorial e información GPS para transmitir el mensaje, y el segundo (HV-TRADE), el historial de posiciones para garantizar la máxima accesibilidad en la emisión. Estos protocolos muestran una mejora considerable en el rendimiento y en la utilización del ancho de banda con ligera pérdida de accesibilidad, porque los nuevos protocolos recogen menos vehículos para retransmitir los mensajes, pero incurrir en una sobrecarga de encaminamiento en la selección de nodos para realizar la retransmisión.

## SERVICIOS Y APLICACIONES

En una VANET, los vehículos están equipados con dispositivos que permiten dos tipos de comunicación: V2V (Vehículo-a-Vehículo) y V2R (Vehículo-a-RSU), también conocida como V2I (Vehículo-a-Infraestructura). Las RSU (*Road Side Units*) son infraestructuras fijas a lo largo de la carretera que también pueden comunicarse entre sí y con otras redes como internet, lo cual permite ampliar la cobertura de transmisión.

Las aplicaciones de las VANET pueden ir desde un simple intercambio de datos hasta la integración de infraestructura con alta complejidad. De manera general, las aplicaciones en una red vehicular tienen la siguiente clasificación:

- *Seguridad*: dispersar información de alerta a aquellos vehículos que puedan localizarse en áreas de accidentes o condiciones peligrosas.
- *Eficiencia de tráfico*: lograr procesar datos útiles que ayuden en la optimización de rutas reduciendo congestiones viales, lo cual baja el consumo de combustible ayudando a minimizar la contaminación.
- *Entretenimiento*: internet, descargas multimedia o chat entre vehículos.

Hoy en día, el desarrollo tecnológico y los avances en las comunicaciones vehiculares han permitido el diseño de diversas aplicaciones (Boukerche *et al.*, 2008), algunas de las cuales ya son posibles en vehículos modernos:

- *Sistemas de alerta ante colisiones*: proveer información a los conductores del entorno, advirtiéndolos sobre accidentes actuales con la finalidad de evitar otro posible choque.
- *Advertencia de distancias de seguridad*: estimar de manera precisa las distancias entre vehículos; con dicha información, el conductor es advertido si las distancias mínimas permitidas son sobrepasadas.
- *Cooperación segura en intersecciones*: los vehículos que llegan a una intersección podrán hacer un intercambio de información para hacer el cruce más seguro. Esto principalmente en aquellos que tienen puntos ciegos.
- *Intercambio de información cooperativo*: los vehículos mantienen la misma velocidad que sus vecinos, fomentando la cooperación en el intercambio de datos por un periodo más prolongado.
- *Diseminación de información vial*: propagar información a vehículos dentro (comunicación directa) y fuera de su área de cobertura (multisalto) sobre información importante del estado de la carretera como flujo de tráfico, congestiones, situaciones peligrosas como accidentes y condiciones meteorológicas que puedan afectar la seguridad.
- *Acceso a internet*: permitir el acceso local de la infraestructura de las carreteras para obtener servicios de entretenimiento.
- *Localización*: asistencia a los conductores para localizar puntos específicos en la ciudad.
- *Estacionamiento automático*: el vehículo podrá estacionarse sin la necesidad de la intervención del conductor.

Sin embargo, las redes *ad hoc* vehiculares continúan en una etapa de investigación, en la que gracias a proyectos donde participan universidades, gobiernos y fabricantes automotrices, se mantiene el compromiso de nuevos desarrollos de sistemas de transporte más sostenibles y protocolos que faciliten y mejoren dichas aplicaciones, todo esto debido a que las VANET son un punto clave del desarrollo social de la próxima década.

Las ciudades del mundo están en proceso de rápida transición hacia sociedades más inteligentes, automáticas, receptivas y flexibles. Con la ayuda de la infraestructura existente como los semáforos, ya utilizados en las ciudades, se han propuesto esquemas para analizar la densidad de tránsito y los sistemas de diseminación de notificaciones de mensajes de alerta (Tripp Barba *et al.*, 2012). De ese modo, los semáforos pueden apoyar a los nodos dentro de una VANET a tomar mejores decisiones y podrán asegurar una disminución en el tráfico

vial (disminuyendo, a su vez, la contaminación). Será posible, además, que los protocolos de encaminamiento envíen los paquetes de datos a vehículos que se encuentran en calles con una cantidad suficiente de vecinos que incremente la posibilidad de entregar los paquetes a su destino (disminuyendo la pérdida de datos). Así, se podrá compartir información actualizada, confiable y en tiempo real referente a las condiciones de tráfico, clima o alertas de seguridad, incrementando la necesidad de un algoritmo de diseminación de información que tome en cuenta los principales beneficios y restricciones de este tipo de redes. Además, habrá de considerar servicios críticos que requieren un cierto nivel de calidad de servicio, lo cual implica un reto importante.

Por todo lo mencionado anteriormente, los protocolos de encaminamiento para VANET tienen la tarea de construir un enlace de comunicación para el envío de información de una fuente a un destino, a través de múltiples saltos, utilizando los nodos intermedios eficientemente. Los protocolos diseñados para redes vehiculares deben mejorar la toma de decisiones al momento de seleccionar los próximos saltos con el propósito de optimizar el intercambio de información, con el objetivo final de perfeccionar la comunicación y lograr minimizar accidentes, reducir congestiones viales, optimizar los recursos para emergencias, etcétera.

## EL PAPEL DE LOS PROTOCOLOS DE ENCAMINAMIENTO EN LOS SERVICIOS ORIENTADOS A REDES VEHICULARES

La seguridad y la eficiencia son dos de los principales requerimientos que pueden mencionarse al momento de clasificar las aplicaciones para VANET (Boukerche *et al.*, 2008). Sin embargo, eficiencia y seguridad no están completamente apartadas la una de la otra; por el contrario, estas y otras características deben ser consideradas en conjunto cuando se diseñan aplicaciones vehiculares. Las aplicaciones para redes VANET deben tener en cuenta todo tipo de información como tráfico vial, estado de las carreteras, condiciones climatológicas, vehículos cercanos, entre otras, con la finalidad de hacer el transporte más seguro y eficiente. Una vez que esta información está disponible, los vehículos pueden compartirla inalámbricamente a través de la red formada por los automóviles, dependiendo del propósito de las aplicaciones, lo cual permitirá minimizar accidentes y mejorar la toma de decisiones de las rutas planeadas.

En el caso de las aplicaciones orientadas a la *seguridad vial*, su principal objetivo es evitar o minimizar accidentes. Estas aplicaciones son altamente sensi-

bles al retardo, pues su eficiencia recae en la rapidez con que se recibe la información sobre un suceso. Además, dependen de la confianza y la cooperación de los vehículos participantes en la red, pues todos los automóviles dentro del área del siniestro deberán enviar notificaciones sobre este para alertar en cruces o zonas de baja visibilidad de la presencia de otro vehículo y poder tomar una decisión que prevenga un choque. Para ello, los protocolos de encaminamiento deben ser capaces de tomar decisiones oportunas y con un tiempo mínimo de retardo, incluyendo como dato fundamental la localización del incidente. En el caso de un accidente vial, en el cual participan varios automóviles, se puede generar un embotellamiento, por lo que un mensaje que notifique sobre este suceso a los conductores cercanos hará que ellos se mantengan alertas. Esta información, a su vez, puede servir para generar rutas alternativas en sus dispositivos de navegación si es que se tenía planeado pasar por el lugar del accidente. En este caso, el objetivo es incrementar la eficiencia de transporte en los vehículos. Los protocolos *geocast* serían los más recomendables, ya que son un tipo específico de protocolos *multicast* donde los grupos de encaminamiento están organizados en función de la posición geográfica de los nodos de la red, ideales para anunciar, por ejemplo, la presencia de un peligro en la carretera de una zona específica.

Lo anterior da paso a otra categoría de aplicaciones orientadas a la *eficiencia de tráfico*, es decir, aquellas que nos apoyan en la toma de decisiones sobre el camino a elegir para llegar a nuestro destino. Por esto se requiere una alta disponibilidad de información en tiempo real, debido a que los conductores la necesitan para tomar decisiones oportunas durante el recorrido. Estas aplicaciones utilizan comunicación V2V y V2I para mejorar el alcance de la información y la disponibilidad de esta. Entre las aplicaciones que se enfocan en la eficiencia de tráfico se encuentran aquellas que gestionan y monitorizan la situación de las vías para mejoramiento de la movilidad y la eficiencia energética, es decir, que dentro de estas aplicaciones se centran en gestionar el tráfico para evitar los embotellamientos. Esto es posible gracias al intercambio de información en la VANET que permite seleccionar la mejor ruta hacia el destino y mejorar tiempos de trayecto. Esta gestión permitirá un tráfico más distribuido en la ciudad, lo cual se traducirá en una reducción de la contaminación y mejores flujos de tráfico.

En este tipo de aplicaciones, los protocolos de encaminamiento deben estar enfocados en una difusión de información en tiempo real. Por maximizar la cantidad de datos compartidos, los protocolos *broadcast* o *multicast* serían los más indicados en este caso, dado que permiten enviar la información a gran

parte de la red y a cada nodo actualizar información de sus rutas, contando con una mayor cantidad de datos que incremente la exactitud de la decisión.

Por otro lado, las aplicaciones orientadas al *confort* o *entretenimiento* (*infotainment*) son aquellas con las que los conductores pueden recibir información y así lograr un trayecto más cómodo y agradable. Este tipo de aplicaciones necesita que los datos recibidos estén disponibles en el momento preciso que el conductor los necesita. Se trata de notificaciones del clima, ubicación de gasolineras o restaurantes, información para turistas (en caso de estar de visita), estacionamiento disponible en la zona de destino, apoyo en el trayecto (mapas y tiempos de trayecto), entre otros aspectos importantes. Dentro del contexto de *confort*, se encuentran aplicaciones más enfocadas en el entretenimiento de los pasajeros, ofreciéndoles acceso a internet, distribución de juegos, *chats*, descarga de música, entre otros. Este tipo de servicios necesitan protocolos de encaminamiento que maximicen la conectividad y la disponibilidad de la información. El reto es cómo mantener actualizada y disponible la información, considerando las características más notables de una VANET, es decir, su dinamismo y la movilidad de los nodos. Esto representa un gran desafío de sincronización entre vehículos y puntos de acceso.

Como se ha repasado, existe una amplia variedad de aplicaciones dentro de los tres grandes grupos para redes vehiculares: seguridad vial, eficiencia de tráfico y entretenimiento, para las cuales los protocolos de encaminamiento siguen siendo desarrollados y adaptados con el fin de mejorar dichos servicios. El reto principal es hacer que la información llegue de manera rápida y que esté siempre disponible para garantizar los beneficios que pueden ofrecer, tomando en cuenta las características y, sobre todo, las restricciones que se pueden encontrar en una red vehicular.

## CONCLUSIONES

Las redes inalámbricas vehiculares son claves para futuros Sistemas de Transporte Inteligente y para futuras implementaciones de ciudades inteligentes (*Smart Cities*). La aparición de las VANET, generada por automóviles equipados con la habilidad de establecer comunicación inalámbrica y de organizarse un enlace *ad hoc* con otros vehículos, abrió un campo de posibles aplicaciones para hacer el transporte más seguro (evitando o minimizando los choques en las carreteras), más eficiente (evitando congestiones viales y disminuyendo el

tiempo de trayecto) y más placentero para los conductores. De hecho, es fácil suponer que las VANET sean las más importantes de las redes móviles *ad hoc*.

Las diferentes características de una red vehicular provocan problemas específicos, presentando exigencias al momento de realizar el diseño de protocolos. Las VANET presentan retos adicionales para los desarrolladores, además de los ya existentes en las redes móviles *ad hoc*. Específicamente, la movilidad de los nodos provoca escenarios dinámicos, importantes cambios en los enlaces y frecuente variación en la topología; en consecuencia, un corto tiempo de vida de los enlaces en las rutas multisalto. Debido a esto, los protocolos diseñados para conocer el estado completo del sistema son ineficientes por los frecuentes cambios en la red.

Durante los últimos años, ha habido avances importantes en la investigación de las VANET y la tecnología relacionada a ellas, lo que ha despertado mucho interés en diferentes comunidades de investigación como la de transporte, comunicación inalámbrica y las redes de datos. Varias empresas automotrices, instituciones de investigación y organizaciones gubernamentales participan actualmente en la evaluación, propuesta, creación e ingeniería de futuros sistemas de redes vehiculares, que ofrecerán oportunidades de desarrollo para la interconexión entre automóviles y las infraestructuras ya existentes en las ciudades. Un aspecto común y fundamental en las redes de vehículos son los diferentes tipos de algoritmos empleados.

Actualmente, existen nuevos retos de investigación en diversas áreas de las redes vehiculares aún por explorar, que esperan ser resueltos para ser incluidos en desarrollos reales y puestos en práctica, ya que la innovación depende en gran medida de la aceptación de la tecnología. Este capítulo trata de resumir y poner en claro las principales características de las redes vehiculares, así como presentar los protocolos de encaminamiento y las diferentes aplicaciones orientadas a ellas, brindando información sobre los retos que este tipo de redes y sus aplicaciones suponen a los diseñadores y desarrolladores de protocolos de encaminamiento.

## REFERENCIAS

Alba Cruz, J. D. (2009). *Estudio y simulación de una red ad hoc vehicular VANET*, Facultad de Ingeniería Electrónica, ESPE, Sede Sangolquí, Ecuador.

- Boukerche, A.; Oliveira, H. A. B. F.; Nakamura, E. F. y Loureiro, A. A. F. (2008). "Vehicular ad hoc networks: A new challenge for localization-based systems", en *Computer Communications*, vol. 31, núm. 12, pp. 2838-2849.
- Canales Pallares, J. (2008). «Redes *ad hoc* entre vehículos», trabajo final de carrera, Universidad Politécnica de Cataluña, Casteldefells.
- Chen, Q.; Cheng, N.; Wang, X. y Liu, F. (2011). "Multi-metric Opportunistic Routing for VANETS in Urban Scenario", en *Proceedings of the International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery*, Beijing, pp. 118-122.
- Chennikara-Varghese, J.; Chen, W.; Altintas, O. y Cai, S. (2006). "Survey of Routing Protocols for Inter-Vehicle Communications", en *Proceedings of the 3rd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking Services*, San Jose, CA., pp. 1-5.
- CISCO VNI (*Visual Networking Index*) (2017). *Global Mobile Data Traffic Forecast Update: 2016-2021*, disponible en <<http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>> [21 de junio, 2017].
- Dimitrakopoulos, G. y Demestichas, P. (2010). "Intelligent Transportation Systems", en *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 5, núm. 1, pp. 77-84.
- Doumenc, H. (2008). «Estudio Comparativo de Protocolos de Encaminamiento en Redes VANET», trabajo final de carrera, Facultad de Informática, Universidad Politécnica de Madrid.
- Gómez Montenegro, C.; Paraldells Aspas, J. y Caballero Herrero, J. E. (2010). *Sensores en todas partes. Tecnología y Soluciones de Redes Inalámbricas*. Barcelona: Fundación Vodafone, España.
- Haas, Z. J.; Pearlman, M. R. y Samar, P. (2002). "The zone routing protocol (ZRP) for *ad hoc* networks", en *Internet draft Mobile Adhoc NET working (MANET)*, Working Group of the Internet Engineering Task Force (IETF).
- Härri, J.; Filali, F. y Bonnet, C. (2006). "Performance Comparison of AODV and OLSR in VANETS Urban Environments under Realistic Mobility Patterns", en *Proceedings of Med-Hoc-Net, 5th IFIP Mediterranean Ad hoc Networking Workshop*, Lipari, Italy, pp. 1-8.
- Hartenstein, H. y Laberteaux, K. (2010). *VANET: Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies*. John Wiley & Sons.
- INEGI (2017). «Vehículos de motor registrados en circulación», disponible en <<http://www.inegi.org.mx/sistemas/bie/?idserpadre=10900530&d10900530#D10900530>> [29 de mayo de 2017].

- Jaap, S.; Bechler, M. y Wolf, L. (2005). "Evaluation of Routing Protocols for Vehicular *Ad Hoc* Networks in City Traffic Scenarios", en *Proceedings of the 11th EUNICE Open European Summer School on Networked Applications*, Colmenarejo, España, pp. 584-602.
- Karp, B. y Kung, H. T. (2000). "GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks", en *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom)*, Boston, pp. 243-254.
- Labiod, H. (2008). *Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*. Wiley-ISTE.
- López Márquez, N. P. (2012). "Performance Evaluation of Bandwidth-Aware Routing Protocol in Urban Scenarios for Vehicular Ad hoc NETWORKS", proyecto final de maestría, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Maihöfer, C. (2004). "A survey of geo cast routing protocols", en *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 6, núm. 2, pp. 32-42.
- Mateos Márquez, M. A. (2012). "Smart City Design for Vehicular Networks (Diseño de una Ciudad Inteligente para Redes Vehiculares)", proyecto final de carrera, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Moustafa, H.; Senoudi, S. M. y Jerbi, M. (2008). "Introduction to Vehicular Networks", en *Vehicular Networks: Techniques, Standards and Applications*. Auerbach Publications-CRC Press (Taylor & Francis Group).
- Naumov, V.; Baumann, R. y Gross, T. (2006). "An evaluation of inter-vehicle ad hoc networks based on realistic vehicular traces", en *Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, Florence, Italy, pp. 108-119.
- Olariu, S. y Weigle, M. A. C. (2009). *Vehicular Networks: From Theory to Practice*. CRC Press.
- Orozco Sarasti, O. y Llano Ramírez, G. (2014). «Aplicaciones para redes VANET enfocadas en la sostenibilidad ambiental, una revisión sistemática», en *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 24, núm. 2, pp. 111-132.
- Orozco, A. M.; Llano, G. y Michoud, R. (2012). «Redes vehiculares *ad hoc*: aplicaciones basadas en simulación», en *Ingenium*, vol. 6, núm. 12, pp. 11-22.
- Perkins, C. (2003). RFC AODV, disponible en <<http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>> [9 de mayo 2017].
- Perkins, C. E. y Royer, E. M. (1999). "Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing", en *Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA)*, New Orleans, pp. 90-100.
- \_\_\_\_\_ (2000). *Ad hoc Networking*. Addison-Wesley.
- Seet, B. C.; Liu, G.; Lee, B. S.; Foh, C. H. y Lee, K. K. (2004). "A-STAR: A Mobile Ad hoc Routing Strategy for Metropolis Vehicular Communications", en

- Networking Technologies Services and Protocols Performance of Computer and Communication Networks Mobile and Wireless Communication*, Networking, Lecture Notes in Computer Science, vol. 3042, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Shafiee, K. y Leung, V. C. M. (2011). "Connectivity-aware minimum-delay geographic routing with vehicle tracking in VANETS", en *Ad Hoc Networks*, vol. 9, núm. 2, pp. 131-141.
- Shafiq, Z.; Mahmud, S. A.; Khan, G. M.; Sayyed, A. y Al-Raweshidy, H. (2012). "Zone Routing Protocol: How does it perform the other way round?", en *Proceedings of the International Conference on ICT Convergence (ICTC)*, Jeju Island, South Korea, pp. 71-77.
- Sun, M. T.; Feng, W. C.; Lai, T. W.; Yamada, K.; Okada, H. y Fujimura, K. (2000). "GPS-based message broadcasting for inter-vehicle communication", en *Proceedings of the International Conference on Parallel Processing*, Toronto, pp. 279-286.
- Tripp Barba, C.; Mateos, M. A.; Regañas, P.; Mezher, A. M. y Aguilar Igartua, M. (2012). "Smart city for VANETS using warning messages, traffic statistics and intelligent traffic lights", en *Proceedings IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Alcalá de Henares, pp. 902-907.
- Urquiza Aguiar, L. F. (2016). "Contribution to the design of VANET routing protocols for realistic urban environments", tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Wang, S. Y. y Chou, C. L. (2009). "NCTUNS tool for wireless vehicular communication network researches", en *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 17, núm. 7, pp. 1211-1226.
- Zhao, J. y Cao, G. (2006). "VADD: Vehicle-Assisted Data Delivery in Vehicular Ad Hoc Networks", en *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, núm. 3, pp. 1910-1922.

# Difusión multisalto de mensajes en redes vehiculares

| ESTRELLA GARCÍA LOZANO, CELESTE CAMPO, CARLOS GARCÍA RUBIO\*  
| UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID (UC3M), ESPAÑA

## INTRODUCCIÓN

Desde principios de los años noventa, la comunidad investigadora ha trabajado para proporcionar a los vehículos capacidad de comunicación. Las primeras propuestas consistían en instalar un dispositivo en el coche que permitiera el pago inalámbrico en los peajes, evitando así las largas filas. Los siguientes pasos fueron más allá: el vehículo debía de ser capaz de comunicarse con los otros automóviles que le rodeaban y también con unidades de comunicación fijas que pudieran desplegarse a lo largo de las carreteras. Estas unidades podrían ser un sistema final en sí mismo o actuar como pasarela hacia otros sistemas particulares o a internet de forma genérica. El objetivo en este caso era mejorar la circulación en las vías, con la evasión o minimización de atascos, salvar vidas por medio de evitar accidentes. Surgieron así muchas acciones de estandarización y despliegue de sistemas de comunicación entre vehículos.

Una vez desarrolladas estas tecnologías de comunicación, se abrió un amplio abanico de aplicaciones que podían desplegarse sobre estas redes. Los autores Schoch *et al.* (2008) identifican cuatro tipos de aplicaciones:

- Aplicaciones de seguridad activa: previenen situaciones peligrosas.
- Aplicaciones de soporte a servicios públicos: herramientas para tomar acciones en caso de accidente (llamar a los servicios de emergencia, alertar a vehículos que se aproximan al lugar del accidente, etcétera).
- Aplicaciones para mejorar la conducción: asesorías a los conductores en su toma de decisiones para realizar una conducción más cómoda y segura.

\* Correos electrónicos: emglozan@it.uc3m.es, celeste@it.uc3m.es, cgr@it.uc3m.es

- Aplicaciones de negocio y entretenimiento: implican el envío de mensajes no críticos para la seguridad y normalmente son de respuesta a una petición, como conocer el tiempo o enviar mensajes de anuncios a grupos de vehículos, por ejemplo, ofertas en determinadas gasolineras.

Con base en esta clasificación y las características específicas de una red vehicular, estos mismos autores diferencian cinco tipos de comunicaciones entre los vehículos:

- Posicionamiento (*beaconing*): su objetivo es actualizar constantemente la información de estado de un vehículo a los vecinos que le rodean. En este caso, los mensajes se envían periódicamente por difusión a los vehículos que están a un solo salto y habitualmente no se reenvía. La comunicación suele ser unidireccional, desde el coche que la envía a sus vecinos a un solo salto.
- Difusión geo-localizada (*geobroadcast*): su objetivo es informar lo más rápidamente posible a todos los vehículos en un área determinada sobre un evento repentino. Por ejemplo, un automóvil que tiene una avería y quiere alertar a los que están próximos o una zona de obras para que se tenga precaución. El esquema de reenvío puede ser optimizado, dependiendo de la densidad de la vía.
- Envío *unicast*: es cuando un vehículo se quiere comunicar con otro, bien de forma unidireccional o bidireccional. Puede consistir en una ruta a un solo salto o a varios saltos hacia un único destino o hacia una región.
- Difusión avanzada de información: su objetivo es proporcionar información entre vehículos en un área determinada, durante un tiempo determinado, enlazando zonas desconectadas si es necesario. En este caso, la estabilidad en el tiempo y una amplia cobertura son más importantes que una baja latencia en el envío de mensajes.
- Agregación de información: ocurre cuando los vehículos que reciben un mensaje lo procesan y le agregan información propia antes de volver a retransmitirlo a la red. De esta forma, se puede obtener un conocimiento global de todos los automóviles que la forman.

Como se aprecia en esta clasificación, es necesario tener un esquema de difusión eficiente de mensajes para que se desplieguen muchos de los servicios objetivo de las redes vehiculares.

La investigación en estas redes se ha aplicado, en algunos casos de forma independiente, a dos tipos de escenarios: por una parte, los entornos de carretera o interurbanos y, por otra, los urbanos. Los retos que ambos suponen son distintos a la hora de crear un mecanismo eficiente de difusión de mensajes. Los entornos urbanos suelen tener altas densidades de vehículos en determinadas zonas o en determinados momentos. Los entornos de carretera suelen tener densidades bajas de tráfico y, por lo tanto, tienen que solventar problemas de desconexiones más frecuentemente. Este capítulo se centra en los entornos de carretera.

Las redes vehiculares, también conocidas como redes VANET<sup>1</sup> (por sus siglas en inglés), son un tipo especial de red MANET (*Multi-hop Ad hoc Network*). El interés en las transmisiones multisalto en MANET ha dado lugar a abundante literatura sobre el tema y algunas de sus ideas se pueden aplicar también a las redes vehiculares.

## DIFUSIÓN EN MANET

Una MANET se caracteriza porque sus nodos son móviles, forman una red total o parcialmente conectada y son capaces de comunicarse siguiendo esquemas uno-a-uno o uno-a-muchos sin la ayuda de un gestor central.

En Ni *et al.* (1999) se realiza un análisis detallado de las principales características de estas redes desde el punto de vista de la difusión de mensajes. La forma más sencilla de difundir información en una MANET es mediante una inundación simple: cada nodo envía cada mensaje que recibe por primera vez. En una red conectada con  $n$  nodos, una difusión provocará  $n-1$  retransmisiones. Sin embargo, como se señala en este mismo trabajo, esto nos lleva a que se produzca el conocido problema de «tormenta» por difusión o *broadcast storm*, en el que se envían en la red un gran número de mensajes, con un aumento elevado de la probabilidad de colisiones, haciendo que las prestaciones de la red se degraden rápidamente.

Después de un análisis detallado del problema, los autores proponen varias soluciones alternativas a la inundación simple, con las que pretenden paliar los problemas de esta a través de esquemas distribuidos; así, definen soluciones basadas en esquemas estadísticos (probabilísticas y con contadores), geométricos (distancia y localización) o en agrupaciones de nodos (*clusters*).

<sup>1</sup> En este capítulo se utiliza red vehicular y VANET indistintamente.

## Esquema probabilístico

Un nodo envía cualquier mensaje nuevo con una probabilidad  $P$ . Si  $P=1$ , es el mismo caso que una inundación simple. Los nodos deben esperar un pequeño retardo aleatorio antes del reenvío para evitar problemas de colisión.

## Esquema basado en el contador

Cada vez que un nodo recibe un mensaje nuevo, inicia un contador,  $c=1$ , y espera un número aleatorio de intervalos de tiempo. Una vez finalizada la espera, envía el mensaje al nivel inferior para retransmitirlo. Si recibe un duplicado antes de que haya retransmitido el mensaje, el contador se incrementa en uno. Si  $c$  alcanza un umbral fijo  $C$ , se cancela la retransmisión.

## Esquema basado en la distancia

Cada nodo es capaz de estimar la distancia desde la cual otro envió un mensaje (según la intensidad de la señal recibida, por ejemplo). Si un nodo recibe un mensaje nuevo, registra esta distancia como  $d_{min}$  y luego espera un número aleatorio de intervalos de tiempo antes de reenviarlo, al igual que en el esquema basado en contador. Cada vez que recibe un duplicado de otro nodo antes de retransmitir su mensaje, verifica si la distancia es más corta y, en su caso, actualiza  $d_{min}$ . Hay un umbral mínimo de distancia,  $D$ , que marca el límite en el que la cobertura añadida por una nueva retransmisión es despreciable. Si en algún momento  $d_{min} < D$ , el nodo cancela la retransmisión.

## Esquema de ubicación

Este esquema puede aplicarse si cada nodo puede obtener sus coordenadas de ubicación mediante, por ejemplo, GPS (*Global Positioning System*). Los nodos incluyen la localización en los mensajes antes de una retransmisión, y así cada uno al recibir un mensaje puede calcular el área adicional exacta que cubriría su retransmisión, denominada AC (de cobertura adicional). A partir de ahí, se procede de forma similar al esquema basado en distancia anterior, solo que en

lugar de un umbral de distancia, se utiliza un umbral de área,  $A$ . Si después de cualquier número de duplicados recibidos,  $AC$  cae por debajo del valor seleccionado, el nodo no reenviará el mensaje.

## Esquema basado en grupos

Se basa en la idea del protocolo de encaminamiento CBRP (*Cluster Based Routing Protocol*) de crear grupos de nodos (*clusters*) (Jiang, Li y Tay, 1999). Cada nodo emite periódicamente mensajes de estado y así cada uno puede determinar su conectividad con los demás. El que tiene un identificador más bajo en un grupo se elige como líder de grupo y el resto se convierte en miembros. Si uno de ellos puede comunicarse con un miembro de otro grupo, entonces se convierte en una pasarela (*gateway*). Si dos líderes de grupo se juntan, el que tiene un valor de identificador mayor se convierte en un miembro más y deja de ser líder. En el esquema de difusión, un nodo que recibe un mensaje nuevo nunca lo reenviará si es un miembro del grupo; solo los líderes del grupo y las pasarelas podrán reenviar mensajes siguiendo alguno de los esquemas anteriores analizados.

Los autores Ni *et al.* (1999) comparan los cinco esquemas (en el caso del mecanismo basado en grupos, los líderes y pasarelas utilizan el esquema basado en la localización para retransmitir) con la ayuda de su propio simulador de eventos discretos. La principal conclusión de su análisis es que si la información de localización está disponible, el esquema basado en la localización tiene el mejor rendimiento porque disminuye la redundancia. Si la localización no está disponible, el esquema que utiliza contadores es más eficaz que la inundación en casos de densidades altas.

En Williams y Camp (2002) podemos encontrar una comparación más amplia, debido a que también incluye una serie de algoritmos basados en grupo (conocidos como métodos de conocimiento de vecinos) que se publicó después del trabajo presentado en Ni *et al.* (1999). Los clasifican en dos categorías: aquellos en los que un nodo localmente toma una decisión sobre el envío y aquellos en los que la decisión es tomada por el salto anterior. En el primer grupo, el algoritmo puede utilizar información sobre los vecinos a un solo salto, o sobre los que están a uno y dos saltos de distancia. En el segundo grupo, la información sobre los vecinos a dos saltos siempre es necesaria. Este conocimiento se logra mediante paquetes *hello* periódicos que cada nodo transmite a

sus colindantes a un salto. Los trabajos que resumen en su artículo se muestran a continuación.

### *Inundaciones con poda propia* (Flooding with Self Pruning)

En esta propuesta (Lim y Kim, 2000), los nodos recopilan información sobre sus vecinos de un solo salto con los paquetes *hello*. Al retransmitir un mensaje, insertan su lista de vecinos. Un nodo que reciba un mensaje nuevo puede comprobar quién de sus propios nodos colindantes ya ha recibido el mensaje. Si el número de los que quedan es superior a un umbral determinado, reenvía el mensaje.

### *Algoritmo de difusión escalable* (Scalable Broadcast Algorithm, SBA)

En este caso (Peng y Lu, 2000), los nodos recopilan información sobre sus vecinos a uno y dos saltos. Los paquetes *hello* contienen el identificador del nodo emisor más una lista de todos sus vecinos a un salto. De forma similar al algoritmo anterior, cuando un nodo recibe un mensaje nuevo, ya conoce el conjunto de vecinos en común con el remitente. Si tiene otros vecinos aparte de ellos, calculará un retardo inversamente proporcional al número de estos. Durante este retardo, puede recibir duplicados y actualizar la lista de vecinos descubiertos. Si al final la lista no está vacía, enviará el mensaje. De esta manera, los nodos con muchos vecinos pueden transmitir primero y posiblemente inhibir retransmisiones de otros que tienen pocos, lo que mejorará la eficiencia.

### *Transmisión ligera y eficiente en toda la red* (Lightweight and Efficient Network-Wide Broadcast, LENWB)

En este mecanismo (Sucec y Marsic, 2000), los nodos necesitan información sobre sus vecinos a uno y dos saltos. Cada nodo recibe un nivel de prioridad de acuerdo con su número de vecinos. Gracias a la información recogida, también conoce de antemano la prioridad de todos sus vecinos a un solo salto. Por lo tanto, cuando un nodo recibe un mensaje nuevo, ya conoce su orden de

prioridad, y si puede cubrir algún nodo adicional que los vecinos de prioridad más alta no pueden, retransmitirá el mensaje.

### *Poda dominante* (Dominant Pruning)

Lim y Kim (2000) también proponen un algoritmo en el que la decisión sobre el reenvío se toma en el salto anterior. Cuando un nodo retransmite un mensaje, incluye la lista de vecinos de un salto que pueden reenviarlo. Esta lista se construye utilizando una adaptación del algoritmo *Greedy Set Cover* (Lovász, 1975). El objetivo es poder cubrir a todos sus vecinos de dos saltos con el número mínimo de retransmisiones a un salto.

### *Reenvío multipunto* (Multipoint Relaying)

Este esquema (Qayyum, Viennot y Laouiti, 2000) es parte de la definición del protocolo de encaminamiento para redes MANET OLSR (*Optimized Link State Routing*) (Clausen y Jacquet, 2003). Funciona de la misma manera que el de poda dominante anterior, con la excepción del algoritmo que selecciona a los vecinos de un salto que enviarán el mensaje; estos son elegidos según el protocolo OLSR y se denominan MPRS (*Multipoint Relays*). Además, la lista de estos MPR se notifica en paquetes *hello* en lugar de en el propio mensaje difundido.

### *Protocolo de difusión ad hoc* (Ad hoc Broadcast Protocol, AHBP)

En este protocolo (Peng y Lu, 2001), en primer lugar, un nodo selecciona los vecinos que van a realizar el reenvío de sus mensajes, denominados *Broadcast Relay Gateways* (BRG), en el momento en el que recibe un nuevo mensaje. Además, el algoritmo descarta a los vecinos ya cubiertos antes de proceder a calcular la lista de BRGS. Por último, el conjunto seleccionado se inserta en el mensaje de difusión, como en el algoritmo de poda dominante anterior. Estas medidas mejoran las prestaciones en redes altamente móviles, porque cuando la topología cambia con frecuencia, las listas de BRG pueden desactualizarse rápidamente.

## Comparación y aplicación en VANET

Williams y Camp (2002) comparan algunos de los protocolos analizados en esta sección mediante simulaciones en NS-2.<sup>2</sup> En concreto, la inundación simple, el esquema basado en contadores, el basado en localización, el algoritmo de difusión escalable (SBA) y el protocolo de difusión *ad hoc* (AHBP). Sus principales conclusiones son que los esquemas probabilísticos y geométricos (basados en localización) son menos eficientes que los esquemas de grupo cuando la densidad de nodos es alta. Además, los que requieren un retardo aleatorio deben adaptarlo al nivel de congestión para mejorar su eficiencia. Con respecto a los esquemas basados en grupos, la movilidad de los nodos degrada los resultados cuando la decisión es tomada no por el elemento que va a reenviar, sino por el anterior.

La mayoría de las soluciones para MANET no son directamente aplicables a las VANET, pero muchas pueden ser adaptadas. Aunque las condiciones en un entorno vehicular son especiales, muchos conceptos de la difusión en MANET siguen siendo adecuados y válidos. Los autores Chen, Jin y Regan (2010) presentan una larga lista de esquemas de difusión publicados en la literatura para VANET y usan una taxonomía similar a la de MANET: probabilística, basado en contador, en distancia, en localización, en grupos y, añaden el caso específico, basado en tráfico. Las ideas principales bajo cada estrategia tradicional permanecen, aunque los algoritmos reales pueden variar ligeramente para adaptarse a las particularidades de las redes vehiculares.

## DIFUSIÓN EN VANET PARA ENTORNOS DE CARRETERA

En los últimos años se han publicado muchos trabajos que abordan el problema de la difusión de mensajes en redes VANET; en esta sección se realiza una selección representativa de los más significativos, orientados a entornos de carretera o interurbanos.

<sup>2</sup> <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

## Difusión Probabilística Optimizada Adaptable (*Optimized Adaptive Probabilistic Broadcast, OAPB*)

Este esquema de difusión pertenece a una arquitectura general para VANET que se presenta en Alshaer y Horlait (2004). Los autores abogan por la difusión de mensajes solo ante situaciones anormales, como frenado repentino, en lugar de enviar actualizaciones frecuentes. Asumen el uso de AODV como protocolo de encaminamiento, por lo que emplean los paquetes *hello* de este protocolo para que los nodos conozcan a sus vecinos. Dada la naturaleza de los mensajes a difundir, el objetivo principal es lograr una entrega rápida y fiable dentro del área a dos saltos desde el vehículo de origen del mensaje.

La estrategia de reenvío es un esquema mixto entre el probabilístico y el basado en distancia, con el fin de minimizar las colisiones que pueden ocurrir cuando se utilizan esquemas basados únicamente en la distancia. En una contienda que emplea distancia, cada vehículo,  $D$ , es consciente de su propia ubicación y de la de la fuente,  $S$ . Antes de reenviar, calcula un retardo,  $\Delta(t)$ , de modo que el primer vehículo que reenvíe sea el más alejado.

$$\Delta(t) = \Delta(t)_{max} \times \left( \frac{R^\epsilon - \|SD\|^\epsilon}{R^\epsilon} \right) \quad (1)$$

En esta ecuación,  $R$  es el rango de cobertura y  $\epsilon$  es un valor de 2 a 4, dependiendo de las características de comunicación del medio. Los autores consideran que la distribución de nodos a lo largo de la carretera es uniforme, por lo que utilizan el valor  $\epsilon = 2$  para hacer también  $\Delta(t)$  uniforme, entre 0 y  $\Delta(t)_{max}$ .

Un inconveniente de este esquema es que los paquetes enviados por vehículos que calculan valores similares de  $\Delta(t)$  pueden colisionar. Para evitarlo, los autores intentan reducir el grupo de vehículos contendientes a aquellos con mayor probabilidad de llegar a un mayor número de vecinos (probabilidad de retransmisión,  $\bar{\phi}$ ). Cada vehículo calcula su probabilidad de retransmisión de acuerdo con la información acerca de los nodos colindantes a dos saltos y a un salto, que obtiene de los paquetes *hello* del protocolo AODV.

Para el nodo  $o$ ,  $SH_o$  es el grupo de vecinos a un salto y  $SH_o^2$  es el grupo de nodos a dos saltos.  $M_{o,cr}$  es el grupo a dos saltos que solo pueden ser alcanzados a través del grupo a un salto  $C_r$ . Podemos calcular así tres tipos diferentes de ratios basados en estos grupos:

$$Pr_0 = \begin{cases} \frac{\sum_{r=1}^{N(SH_0)} N(M_{o:cr})}{N(SH_0)} & \text{si } \sum_{r=1}^{N(SH_0)} N(M_{o:cr}) \leq N(SH_0) \\ 1 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2)$$

$$Pr_{0_{SH}} = \frac{N(SH_0)}{N(SH_0) + N(SH_0^2)} \quad (3)$$

$$Pr_{0_{SH^2}} = \frac{N(SH_0^2)}{N(SH_0) + N(SH_0^2)} \quad (4)$$

$Pr_0$  es una medida de qué tan adecuado es utilizar este nodo como retransmisor (*relay*).  $Pr_{0_{SH}}$  y  $Pr_{0_{SH^2}}$  representan la proporción de vecinos a un salto y a dos saltos, respectivamente. Es importante indicar que estos valores se calculan de forma local en cada nodo. Finalmente, la probabilidad de retransmisión se calcula utilizando los tres valores anteriores, como se indica en la ecuación 5.

$$\bar{\phi} = (Pr_0 + Pr_{0_{SH}} + Pr_{0_{SH^2}})/3 \quad (5)$$

De las definiciones anteriores, podemos ver que  $Pr_{0_{SH}} + Pr_{0_{SH^2}} = 1$  y por lo tanto,  $\bar{\phi}$  es una función lineal de grado uno de  $Pr_0$ .

$$\bar{\phi} = (Pr_0 + 1)/3 = \frac{Pr_0}{3} + \frac{1}{3} \quad (6)$$

El papel del valor resultante es doble. En primer lugar, limita el número de vehículos en la contienda. Si el valor de  $\bar{\phi}$  de un vehículo es menor que el umbral 0,5, este no tomará parte de la contienda. Además, este valor es el que determina la espera antes del reenvío del mensaje y no la distancia a la fuente.

$$\Delta(t) = \Delta(t)_{max} \times (1 - \bar{\phi}) + \delta \quad (7)$$

$\delta$  es una espera aleatoria adicional de milisegundos y evita que los mensajes de vehículos con un valor similar de  $\bar{\phi}$  colisionen.

Los autores evalúan su propuesta comparándola con los esquemas de referencia de probabilidad fija y los basados en distancia. Comparado con una probabilidad fija, este esquema presenta una baja redundancia (solo ligeramente superior) junto con una buena cobertura (más de 90 % vehículos alcanzados).

De acuerdo con sus resultados de simulación, esta cobertura es aproximadamente la misma que la obtenida con un esquema basado en distancia, pero más lenta. Los autores no evalúan la sobrecarga de la solución en comparación con la de los esquemas probabilísticos y basados en distancia.

### Difusión Vehicular Multisalto (*Multihop Vehicular Broadcast, MHVB*)

MHVB (Osafune, Lin y Lenardi, 2006) se propone como una solución eficiente para la difusión multisalto de mensajes en la arquitectura GeoNetworking (ETSI, 2014). Se centra en entregar mensajes en un área muy limitada (50-300m) y con una latencia reducida (0.1-0.5s). Estos mensajes no son notificaciones aisladas sino actualizaciones de estado, por lo que se espera cierta periodicidad en los mismos. La emisión continua de información puede llegar a provocar congestión en la VANET. Así, los autores proponen un protocolo que se compone a su vez de dos algoritmos: (1) el de retroceso (*backfire*) que se centra en la difusión eficiente de los mensajes enviados, mientras que (2) el de detección de congestión de tráfico previene la congestión a través de medir las retransmisiones.

El algoritmo de retroceso (*backfire*) parte de la suposición de que una transmisión normal tiene un rango de recepción de unos 200 m, mientras que en una difusión se desea cubrir un rango más amplio,  $D_{max}$ . Así, si un vehículo recibe un mensaje nuevo, primero verifica si está dentro del área de interés o no. Si es así, calcula la distancia al nodo del que recibió el mensaje. Antes de reenviar, espera un intervalo que es inversamente proporcional a la distancia estimada, de modo que el automóvil más alejado es el primero en retransmitir. La nueva retransmisión hará que el resto de vehículos no lo retransmitan finalmente. Los autores no proporcionan una ecuación para el cálculo de este retardo.

En el algoritmo de detección de congestión del tráfico, se supone que cada vehículo tiene sensores de corto alcance que permiten detectar nodos cercanos. De esta manera, sería fácil concluir que hay congestión de tráfico si el número de vehículos detectados es alto. En concreto, las condiciones que se consideran son: 1) el número de nodos detectados es mayor que un umbral  $N_{max}$ , 2) el número de vehículos tanto en la parte delantera como en la parte trasera es superior al umbral  $N_{fb}$  y 3) la velocidad del automóvil está por debajo de  $V_{max}$ . Cuando todas ellas aplican, el periodo de transmisión de información,  $T_{def}$  debe extenderse, aunque los autores tampoco ofrecen una ecuación para calcularlo.

Una versión mejorada de este algoritmo, *Enhanced MHVB*, se presenta en Mariyasagayam, Osafune y Lenardi (2007). Definen la denominada «región de retroceso», siendo una sección en lugar de un círculo. Los vehículos cuyo temporizador no ha expirado antes de escuchar una nueva retransmisión solo la cancelarán si se cumplen las condiciones de las ecuaciones 8 y 9:

$$|\vec{a}| > |\vec{b}| \quad (8)$$

$$\frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|} \geq \cos \theta \quad (9)$$

donde  $\vec{a}$  y  $\vec{b}$  son, respectivamente, los vectores de posición de los vehículos A y B con respecto al origen del mensaje, y  $\theta$  es el ángulo de la región de retroceso. Esto permite que la difusión sea flexible y direccional.

También incluyen la denominada «programación dinámica», los vehículos que están a 200 m o más del remitente reenviarán el mensaje inmediatamente. Se espera que esto reduzca la latencia y ahorre recursos al cubrir el área entre ellos y el origen.

Los autores simulan su solución con NS-2 en una variedad de escenarios, demostrando que el uso de una región de retroceso es relativamente mejor que el retroceso circular. La programación dinámica mejora significativamente la tasa de éxito, entendida como la manera de cómo llegar a todos los vehículos en un radio determinado desde el remitente, en menos de una cierta cantidad de tiempo.

### Difusión *ad hoc* y Multisalto (*Ad hoc and Multihop Broadcast, AMB*)

En el trabajo de Korkmaz, Ekici y Ozguner (2007), los autores proponen dos protocolos que abordan los dos principales problemas de los mecanismos de difusión, la tormenta de mensajes y el problema del nodo oculto. Las soluciones proporcionadas son a nivel MAC (*Medium Access Control*); por una parte, está AMB (*Ad hoc Multihop Broadcast*) que es totalmente distribuido, y por otra, UMB (*Urban Multihop Broadcast*) que hace uso de infraestructura. El primero se utiliza, en principio, solo en carreteras y el segundo está destinado a los entornos urbanos, en cuyas intersecciones pueden desplegarse dispositivos inalámbricos para orquestrar la difusión. Nos centraremos en describir el primero de ellos. La estrategia consiste en una difusión basada en distancia.

El remitente emite un RTB (*Request To Broadcast*), similar al RTS de IEEE 802.11, que incluye su posición y dirección. Cada vehículo receptor calcula la distancia entre el emisor y él mismo,  $d$ . El rango de recepción,  $R$ , se divide en  $N_{max}$  segmentos iguales y esta distancia determina en cuál de ellos se encuentra el automóvil. Cada receptor envía una ráfaga de energía (señal de interferencia de canal), llamada «ráfaga negra», cuya longitud es una función de la distancia estimada:

$$L_1 = \left\lceil d \cdot \frac{N_{max}}{R} \right\rceil \cdot SlotTime \quad (10)$$

donde el primer término es el número de intervalos de tiempo, cada uno de longitud  $SlotTime$ , que la ráfaga negra mantendrá ocupados. Dado que este número es proporcional a la distancia, el vehículo colocado en el segmento más lejano emitirá la ráfaga negra más larga. Si un nodo encuentra un canal silencioso después de su ráfaga negra, significa que es el vehículo más alejado del remitente. A continuación, enviará un CTB (*Clear To Broadcast*) para anunciar que ganó la contienda. Cuando el remitente recibe un CTB, retransmitirá el paquete que se quiere diseminar en la red. Puede ocurrir que haya más de un vehículo en el segmento más alejado, en este caso, sus ráfagas negras tendrán la misma longitud y sus CTB colisionarán. El nodo fuente enviará un nuevo RTB para iniciar una nueva contención. Solo los ganadores de la anterior participarán, dividiendo su segmento actual en  $N_{max}$  subsegmentos. Si después de un número máximo de repeticiones todavía no hay un solo ganador, uno será elegido al azar.

Nos centraremos en detallar la estrategia destinada a la difusión interurbana denominada AMB. Con el fin de repartir la difusión en diferentes direcciones de una manera *ad hoc*, primero tenemos que definir el área de intersección. Si el rango de transmisión es  $R$  metros, el área pasa de  $R/2$  metros antes del centro de intersección a  $R/2$  metros después. Un ganador de difusión direccional que se encuentre en un momento dado dentro de un área de intersección se convierte en un «cazador». Es el encargado de encontrar el vehículo más cercano al centro de la intersección. Por lo tanto, en lugar de un RTB, envía un I-RTB (*Intersection RTB*) y los receptores emiten una ráfaga negra de longitud  $\hat{L}_i$  que crece más a medida que la distancia al punto central,  $\hat{d}$ , se hace más corta. Siendo  $(X_n, Y_n)$  la posición del vehículo que está enviando la ráfaga negra, y  $(X_{int}, Y_{int})$  la de la intersección, se calcula como sigue:

$$\hat{d} = \sqrt{(X_n - X_{int})^2 + (Y_n - Y_{int})^2} \quad (11)$$

$$\hat{L}_i(\hat{d}) = (N_{max} - 1) - L_i(\hat{d}) \quad (12)$$

El resto del mecanismo de contención es análogo a la difusión direccional. El vehículo ganador inicia una difusión direccional para cada dirección que está presente en la intersección, excepto la ya cubierta.

Los autores comparan su propuesta con un esquema basado en distancia y uno aleatorio. Ninguno de ellos es consciente de los vecinos que les rodean o de la topología de la carretera. Cuando se utiliza el basado en distancia, un vehículo espera un lapso que es proporcional a la distancia a la fuente,  $\hat{d}$ , antes de reenviar un mensaje nuevo, tal como se expresa en la ecuación 13:

$$WT = maxSlot \times \left( 1 - \left\lfloor \frac{\hat{d}}{Range} \right\rfloor \right) \times SlotTime \quad (13)$$

El esquema aleatorio calcula un retardo antes del reenvío:

$$WT = nSlot \times SlotTime \quad (14)$$

En estas ecuaciones, *maxSlot* es el máximo tiempo de espera en las ranuras, *nSlot* es un número aleatorio en el rango  $[0, maxSlot]$ , y *SlotTime* es la duración de la ranura en IEEE 802.11, y *Range* es el rango de recepción.

En Korkmaz, Ekici y Ozguner (2007), los autores utilizan su propio simulador para probar los diferentes esquemas. Las prestaciones de AMB superan las del resto de los esquemas en términos de cobertura y sobrecarga.

### *Dynamic Backbone-Assisted* MAC (DBA-MAC)

Esta solución de nivel MAC construye proactivamente un *backbone* (BB) por medio de agrupaciones. Esto permite una difusión rápida y fiable de mensajes de alarma en una determinada zona, denominada «zona de riesgo». Como objetivos secundarios, los autores desean lograr efectividad, equidad y escalabilidad.

Para crear el BB, el esquema utiliza mensajes *BEACON* que incluyen la siguiente información sobre el vehículo emisor:  $\langle ID, (x, y), R, velocidad, dir, horizonte \rangle$ , donde *ID* es el identificador del vehículo,  $(x, y)$  son sus coordenadas

de ubicación,  $R$  su alcance de transmisión, *velocidad* su velocidad media, *dir* es su dirección y *horizonte* es el límite de la zona de riesgo ( $RZ$ ).

Cuando un vehículo no recibe ningún *BEACON* durante un intervalo de longitud  $RefTim$ , se elige a sí mismo como miembro de un nuevo *BB* y transmite un *BEACON*. Los nodos que lo reciben y viajan en la misma dirección son candidatos a convertirse en el próximo salto hacia atrás en el *BB*. Se utiliza una contención de nivel *MAC* para seleccionar a uno de ellos. El objetivo es elegir el automóvil que se espera que esté conectado al vehículo anterior,  $prev\_hop$ , al menos hasta la próxima actualización del *BB*,  $BB\_REFR$ , pero también lo más lejos posible de ella después de ese tiempo. Por lo tanto, todos los vehículos que estiman que no permanecerán en el rango de transmisión de  $prev\_hop$  durante  $BB\_REFR$  dejarán la contienda. El resto calcula su Factor de Ajuste (*Fit Factor*,  $FF$ ) siguiendo la ecuación 15:

$$FF(A) = \frac{dist(A,B) + \Delta v \times BB\_REFR}{R} \quad (15)$$

Este parámetro es una estimación de la distancia entre el candidato,  $A$ , y el vehículo en el *BB* ( $prev\_hop$ ),  $B$ , después de  $BB\_REFR$ , normalizado al rango de transmisión.  $FF$  se utiliza para controlar dinámicamente la ventana de contención del esquema de retroceso de nivel *MAC* para enviar un mensaje de *CANDIDATURE*, como se muestra en ecuación 16:

$$CW = \max\{0, (1 - FF(A))\} \times (CWMAX - CWMIn) + CWMIn \quad (16)$$

Si el  $FF$  del vehículo  $A$  está cerca de 1, el tamaño de la ventana de congestión,  $CW$ , será pequeño y por lo tanto tendrá una alta probabilidad de ganar la contienda. Cuando el vehículo del *BB*,  $B$ , recibe el primer mensaje de *CANDIDATURE*, envía un mensaje *ACK\_WINNER* al remitente. El resto de los vehículos que participan en la disputa abortan su retroceso en el momento en que escuchan el mensaje de *CANDIDATURE*.

En caso de que el vehículo que dirige un *BB* reciba un mensaje *BEACON* desde otro vehículo en frente de él, el primero enviará inmediatamente un mensaje *CANDIDATURE* después del intervalo *SIFS*. De esta manera, dos *BBS* contiguos se unen en un solo paso.

Durante la diseminación del mensaje, los miembros del *BB* tienen prioridad sobre el uso del canal, de manera que consigan retransmitir el mensaje. Esto permite minimizar el número de nodos de reenvío (dado que son miembros

del *BB* debido a su ubicación) y entregar de forma rápida el mensaje. Si un vehículo en el *BB* envía una alerta por difusión, el siguiente salto inmediatamente responde con un *ACK unicast* (solo espera hasta que el *SIFS*, *Short Interframe Space*, haya terminado). A continuación, sin soltar el control del canal, difunde la alarma. Esta estrategia se denomina *Fast Multi-hop Forwarding* (FMF).

Si un nodo del *BB* no recibe un *ACK* del salto siguiente después de difundir una alarma, significa que el *BB* está roto. En este caso, los vehículos participan en un esquema basado en la distancia. Cada vehículo comienza un *backoff* después de recibir una alarma con el fin de difundirla a su vez. Si un vehículo es un miembro de *BB*, la ventana de congestión se configura con un valor bajo. Si no lo es, la ventana es inversamente proporcional a la distancia al vehículo que envió el mensaje, como se especifica en la ecuación 17.

$$CW = \max\{0, (1 - \text{dist}(\text{self}, \text{sender})/R)\} \times (CW_{MAX} - CW_{Min}) + CW_{Min} \quad (17)$$

El primer vehículo en terminar su *backoff* sin oír un *ACK* difunde la alarma y el resto aborta sus retransmisiones. Esto es una adaptación del protocolo de Difusión Rápida (Palazzi *et al.*, 2007).

Los autores comparan esta solución con otras dos estrategias mediante simulaciones en NS-2. Una de ellas es el protocolo de Difusión Rápida, que es la base para el peor de los casos (cuando hay un *backbone* roto). La otra estrategia con la que se compara es la inundación simple. Como podríamos esperar, la inundación simple causa un gran número de retransmisiones, lo que conduce a un alto porcentaje de colisiones. El uso del *backbone* permite que el número de retransmisiones se acerque al óptimo teórico y reduce significativamente el número de colisiones. Los resultados muestran que esta solución es capaz de superar en prestaciones a la Difusión Rápida. También es más rápida que las otras dos estrategias.

## Difusión Vehicular Distribuida (*Distributed Vehicular Broadcast*, DV-CAST)

DV-CAST (Tonguz, Wisitpongphan y Bai, 2010) es una solución a nivel de red de propósito general destinada a carreteras. El objetivo es evitar la tormenta de difusión en redes de alta densidad, así como la interrupción de la difusión

en las desconectadas. Su funcionamiento se basa en tres componentes: la detección de vecinos (para estimar la topología local de un vehículo), un mecanismo de supresión de difusión y un mecanismo de almacenamiento y reenvío (*store-carry-forward*).

### *Detección de vecinos*

Depende de la información de los vecinos a un salto. Consiste en una tupla,  $\langle \textit{latitud}; \textit{longitud}; \textit{dirección} \rangle$ , proporcionada por el servicio de GPS. Se extrae tanto de los mensajes periódicos *hello* como de campos específicos en los mensajes de datos. Con la información recibida, cada vehículo crea tres listas:

- Lista *NBFRONT*: vecinos delante (vehículos por delante).
- Lista *NBBACK*: vecinos en la parte posterior (vehículos que nos siguen).
- Lista *NBOPPOSITE*: vecinos en la dirección opuesta.

Estas listas se ordenan según los datos más recientes y tienen un límite de tamaño  $MAX_{NB}$  (en la implementación de los autores, tienen un tamaño máximo de cinco posiciones).

Para cada difusión, se define una región de interés (*Region of Interest*, ROI) a partir de la fuente del mensaje. Cuando se combina este valor con la información de vecinos, cada vehículo es capaz de determinar el valor de los siguientes indicadores binarios:

- Indicador de destino (*Destination Flag*, DFlg): el vehículo sigue al originador del mensaje.
- Conectividad en la dirección del mensaje (*Message Direction Connectivity*, MDC): hay al menos un vecino a un salto que lo sigue.
- Conectividad en la dirección opuesta (*Opposite Direction Connectivity*, ODC): hay vecinos de un salto que viajan en el sentido opuesto.

### *Mecanismo de supresión de difusión*

Los autores presentan y evalúan tres alternativas: *p-persistente ponderado*, *1-persistente ranurado* y *p-persistente ranurado*:

- *p-persistente ponderado*: consiste en una adaptación de la conocida inundación probabilística. Utiliza una probabilidad de reenvío,  $p$ , que es función de la distancia a la fuente del mensaje, como se muestra en la ecuación 18.

$$p_{ij} = \frac{D_{ij}}{R} \quad (18)$$

En esta ecuación,  $D_{ij}$  es la distancia entre el remitente  $i$  y el receptor  $j$ , de acuerdo con la información del GPS.  $R$  es el rango de transmisión y  $p_{ij}$  es la probabilidad calculada. Con el fin de dar precedencia a los vehículos más alejados, el receptor espera un tiempo  $WAIT\_TIME$  preconfigurado para permitir la llegada de duplicados. Luego, calcula  $p_{ij}$  como una función de la distancia al retransmisor más cercano.  $WAIT\_TIME$  debe ser mayor que el retardo MAC acumulado por cada nodo. Si un vehículo determinado decide no reenviar pero no detecta ningún otro que lo haga después de  $WAIT\_TIME + \delta$ , lo reenvía con probabilidad  $p=1$ .  $\delta$  tiene en cuenta los retardos de transmisión y propagación de un salto.

- *1-persistente ranurado*: en lugar de una probabilidad de reenvío, cada vehículo calcula después de  $WAIT\_TIME$  la ranura de tiempo  $T_{S_{ij}}$ , en la que intentará reenviar.

$$T_{S_{ij}} = \tau \times N_s \left( 1 - \left\lfloor \frac{\min(D_{ij}, R)}{R} \right\rfloor \right) \quad (19)$$

$N_s$  es el número prefijado de ranuras y  $\tau = WAIT\_TIME + \delta$ . Si se escucha otro vehículo reenviando en una ranura de tiempo anterior, se inhibe la retransmisión.

- *p-persistente ranurado*: es similar al esquema *1-persistente ranurado*. Sin embargo, al terminar  $T_{S_{ij}}$ , los vehículos reenvían con una probabilidad fija,  $p$ . Al igual que con el esquema *p-persistente ponderado*, un vehículo que no reenvió, después de que el temporizador expira, espera un tiempo adicional. Los autores sugieren que este tiempo podría ser  $([N_s - 1] \times WAIT\_TIME + \delta)$  ms. Si incluso después de esta espera el nodo aún no ha recibido ningún duplicado, debe reenviar. Para la implementación de DV-CAST, los autores seleccionan *1-persistente ranurado* con  $N_s = 3$ .

### *Mecanismo de almacenamiento y reenvío (store-carry-forward)*

Cuando no hay ningún vehículo que pueda reenviar, el último almacena el mensaje hasta que encuentre a alguien que pueda seguir enviándolo en la misma dirección, es decir, hacia atrás con respecto al vehículo fuente. En esta solución, este concepto se aplica diferenciando tres posibles casos de situación de los vecinos:

- Caso I: cuando  $MDC = 1$ . El tráfico detrás es posiblemente denso, por lo que el vehículo actual debe aplicar el mecanismo de supresión de difusión.
- Caso II: cuando  $MDC = 0$  y  $ODC = 1$ . Si  $DFlg = 1$  también, esto significa que nadie está siguiendo a este vehículo, pero un vehículo que conduce en la dirección opuesta puede ser el siguiente retransmisor. Después, el vehículo avanza y se vuelve inactivo. Pero si  $DFlg = 0$ , el vehículo ajusta un temporizador después del reenvío. Si detecta que un vehículo que viaja en la dirección opuesta reenvía el mensaje, puede quedar inactivo. Si oye un paquete de *hello* de un vehículo en la dirección opuesta, avanza de nuevo y restablece el temporizador. Por último, si el temporizador expira sin encontrar un nuevo vehículo dispuesto a reenviar, él mismo deja de hacer *store-carry-forward*.
- Caso III: cuando  $MDC = 0$  y  $DC = 0$ . Esto significa que el vehículo está solo. Establece un temporizador y espera uno de los siguientes eventos. Si oye un paquete *hello* de un nuevo vehículo en su mismo sentido, cambia al primer caso porque  $MDC = 1$  ahora. Si recibe un paquete *hello* de un vehículo en sentido opuesto, cambia a  $ODC = 1$  y, por lo tanto, al segundo caso. Si el temporizador expira, detiene el *store-carry-forward*.

Para la evaluación, DV-CAST se compara con la inundación simple y el esquema de supresión de difusión *1-persistente ranurado* mediante simulaciones en NS-2. Las métricas de rendimiento son fiabilidad, eficiencia y escalabilidad. La fiabilidad mide el éxito en función de la distancia. El éxito se entiende como llegar a todos los vehículos en la zona de interés o hasta el final. La eficiencia se refiere a la velocidad en cubrir el ROI. Por último, la escalabilidad se mide como el número medio de duplicados generados del mismo mensaje. Además, comentan el efecto de dos parámetros: la frecuencia de los paquetes *hello* y la inexactitud de las lecturas GPS. La conclusión general es que la incorporación de un mecanismo de *store-carry-forward* mejora en gran medida el éxito,

mientras que incurre en una pequeña sobrecarga con respecto a un esquema de solo difusión.

### *Mecanismo eficiente de difusión de mensajes no-críticos basado en distancia*

En el trabajo publicado en García-Lozano *et al.*, (2013) se ha propuesto una mejora de los esquemas basados en distancia para la difusión de mensajes no-críticos en VANET en entornos de carreteras; el objetivo es definir un nuevo mecanismo eficiente en ancho de banda y que maximice el número de vehículos alcanzados, aunque suponga una penalización del tiempo de recepción de los mensajes. Así, cuando un nodo recibe un nuevo mensaje, aguarda un tiempo  $W$  en el que espera recibir duplicados de este mismo mensaje. Si recibe alguno, almacena la distancia al nodo más cercano del que ha recibido un duplicado y a continuación calcula el retardo de reenvío  $t_w$  como:

$$t_w = T_{max} \times (1 - \min\{|d(x, x_{relay})|\}) / r \quad (20)$$

donde  $T_{max}$  es un tiempo de espera máximo (configurable) y  $r$  es el radio de cobertura.

Cuando el segundo temporizador ( $t_w$ ) finaliza, el nodo reenvía el mensaje. De esta forma, el vehículo que está a mayor distancia tiene el menor tiempo de espera. Al contrario que otros mecanismos como el *1-persistente ranurado*, usamos una expresión de tiempo continua para evitar colisiones. Cuando el resto de nodos escuchan este mensaje, abortan el proceso de reenvío que tuviesen programado. La selección de  $T_{max}$  es clave para las prestaciones del esquema y en el trabajo citado se estudia como se debe configurar. El mecanismo también se complementa con una propuesta de funcionamiento basada en *store-carry-and-forward* similar a la de DV-CAST.

El esquema propuesto se evalúa utilizando NS-2 como simulador y se comparan sus prestaciones con DV-CAST con resultados satisfactorios.

## CONCLUSIONES

En este capítulo se ha realizado una descripción de los protocolos listados en la Tabla I, que se presenta a modo de resumen. Podemos ver que estas soluciones

TABLA I. Resumen de los principales trabajos de difusión interurbana.

	Objetivo	Necesita infraes- tructura	Necesita <i>beacons</i>	Selección de <i>relays</i>	Asen- tidos	<i>Store carry forward</i>
OAPB, 2005	rápido	no	sí	probabilístico	no	no
MHVB, 2006	eficiente	no	no	basado en distancia	no	no
AMB, 2007	eficiente, fiable	no	no	basado en distancia	<i>hand shake</i>	no
DBAMAC, 2007	rápido, eficiente, fiable	no	sí	agrupamiento ( <i>backbone</i> ), basado en distancia	sí	no
DVCAST, 2010	eficiente, resistente a desconexiones	no	sí	basado en distancia, detección de vecinos	no	sí

no asumen que la VANET tenga infraestructura de apoyo, al menos no en cada carretera del mundo. Por lo tanto, todas ellas son capaces de trabajar de una manera completamente *ad hoc* y distribuida.

Hay dos intereses principales de acuerdo con el tipo de mensaje: ser rápido si el mensaje es una incidencia, o ser eficiente, en caso contrario. Para eficiencia, el esquema de difusión multisalto básico preferido es una contención de tiempo basada en la distancia al salto anterior. Esto se espera que minimice el número de saltos necesarios para cubrir el área de interés, y por lo tanto, el número de duplicados. Para una difusión rápida, se seleccionan algoritmos que no implican una contención de tiempo en el momento del envío. Por ejemplo, los esquemas probabilísticos o de agrupamiento son muy populares. Otras dos características son la fiabilidad y la resistencia a las desconexiones. Sin embargo, estos son vistos como objetivos secundarios, ya que no se consideran en la mayoría de la literatura.

En los últimos años se han definido también varios mecanismos adaptados a entornos urbanos, algunos de ellos son variantes adaptadas de los mecanismos definidos en carretera. Entre todos ellos destacan los siguientes: Difu-

sión Multisalto Urbana (*Urban Multihop Broadcast*, UMB) (Korkmaz, Ekici y Ozguner, 2007), MHVB Urbano (*Urban MHVB*) (Mariyasagayam, Menouar y Lenardi, 2009), Difusión Vehicular Urbana (*Urban Vehicular Broadcast*, UV-CAST) (Viriyasitavat, Tonguz y Bai, 2011), Reenvío en Dos Ángulos (*Two Angles Forwarding*, TAF) (Salvo *et al.*, 2012), Difusión Asentida Estática y Altamente Móvil (*Acknowledged Broadcast from Static to highly Mobile*, ABSM) (Ros, Ruiz y Stojmenovic, 2012), Reducción Mejorada de Difusión en Calles (*Enhanced Street Broadcast Reduction*, esBR) (Martínez *et al.*, 2010), Difusión mejorada de Mensajes Basados en Mapas de Carreteras (*Enhanced Message Dissemination based on Roadmaps*, eMDR) (Fogue *et al.*, 2012), Difusión Adaptativa en Tiempo Real y con Posición Más Cercana a la Intersección (*Nearest Junction Located*, NJL, and *Real-Time Adaptive Dissemination*, RTAD) (Sanguesa *et al.*, 2015), y la propuesta hecha por nosotros con base en la definida en la difusión en carretera y que está detallada en García Lozano (2016).

El reto a futuro es conseguir que estas tecnologías se implanten en los vehículos reales y se comiencen a desplegar servicios que realmente ofrezcan un valor añadido al usuario, tanto para su seguridad, como para recibir información, ofertas y servicios de forma personalizada.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alshaer, H. y Horlait, E. (2004). “Emerging client-server and ad hoc approach in inter-vehicle communication platform”, en *Proceedings of the IEEE 60th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, USA, pp. 3955-3959.
- \_\_\_\_\_ (2005). “An optimized adaptive broadcast scheme for inter-vehicle communication”, en *Proceedings of the IEEE 61st Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, Sweden, pp. 2840-2844.
- Chen, R.; Jin, W. L. y Regan, A. (2010). “Broadcasting safety information in vehicular networks: issues and approaches”, en *IEEE Network*, vol. 24, núm 1, pp. 20-25.
- Clausen, T. y Jacquet, P. (2003). “RFC Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)”, disponible en <<https://tools.ietf.org/html/rfc3626>> [9 de mayo 2017].
- ETSI (2014). *European Standard EN 302 636-4-1 V1.2.1: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular communications; GeoNetworking; Part 4: Geographical addressing and forwarding for point-to-point and point-to-multipoint communications; Sub-part 1: Media-Independent Functionality*.

- Fogue, M.; Garrido, P.; Martínez, F. J.; Cano, J. C.; Calafate, C. T. y Manzoni, P. (2012). "Evaluating the impact of a novel message dissemination scheme for vehicular networks using real maps", en *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 25, pp. 61-80.
- García Lozano, E. (2016). "Schemes for multi-hop dissemination of non-safety information in VANETS", tesis de doctorado, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid.
- \_\_\_\_\_; Campo, C.; García Rubio, C.; Cortés Martín, A.; Rodríguez Carrión, A. y Noriega Vivas, P. (2013). "A Bandwidth-Efficient Service for Local Information Dissemination in Sparse to Dense Roadways", en *Sensors*, vol. 13, pp. 8612-8639.
- Jiang, M.; Li, J. y Tay, Y. C. (1999). "INTERNET-DRAFT Cluster Based Routing Protocol (CBRP)", disponible en <<https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-ma-net-cbrp-spec-01>> [9 de marzo 2017].
- Korkmaz, G.; Ekici, E. y Ozguner, F. (2007). "Black-Burst-Based Multihop Broadcast Protocols for Vehicular Networks", en *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, núm. 5, pp. 3159-3167.
- Lim, H. y Kim, C. (2000). "Multicast Tree Construction and Flooding in Wireless Ad Hoc Networks", en *Proceedings of the 3rd ACM International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM)*, Boston, pp. 61-68.
- Lovász, L. (1975). "On the ratio of optimal integral and fractional covers", en *Discrete Mathematic*, vol. 13, núm. 4, pp. 383-390.
- Mariyasagayam, M. N.; Menouar, H. y Lenardi, M. (2009). "An adaptive forwarding mechanism for data dissemination in vehicular networks", en *Proceedings of the IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Tokyo, Japan, pp. 1-5.
- \_\_\_\_\_; Osafune, T. y Lenardi, M. (2007). "Enhanced Multi-Hop Vehicular Broadcast (MHVB) for Active Safety Applications", en *Proceedings of the 7th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, Sophia, Antipolis, France, pp. 1-6.
- Martínez, F. J.; Fogue, M.; Coll, M.; Cano, J. C.; Calafate, C. T. y Manzoni, P. (2010). "Evaluating the Impact of a Novel Warning Message Dissemination Scheme for VANETS Using Real City Maps", en M. Crovella, L. Feeney, D. Rubenstein y S. V. Raghavan (eds.), *NETWORKING 2010*, vol. 6091, pp. 265-276. Springer Berlin Heidelberg.
- Ni, S. Y.; Tseng, Y. C.; Chen, Y. S. y Sheu, J. P. (1999). "The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network", en *Proceedings of the 5th annual ACM/*

- IEEE international conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, Seattle, Washington, USA, pp. 151-162.
- Osafune, T.; Lin, L. y Lenardi, M. (2006). "Multi-Hop Vehicular Broadcast (MHVB)", en *Proceedings of the 6th International Conference on ITS Telecommunications*, Chengdu, China, pp. 757-760.
- Palazzi, C. E.; Ferretti, S.; Rocchetti, M.; Pau, G. y Gerla, M. (2007). "How Do You Quickly Choreograph Inter-Vehicular Communications? A Fast Vehicle-to-Vehicle Multi-Hop Broadcast Algorithm, Explained", en *Proceedings of the 4th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, NV, USA, pp. 960-964.
- Peng, W. y Lu, X. (2001). "AHBP: An efficient broadcast protocol for mobile ad hoc networks", en *Journal of Computer Science and Technology*, vol. 16, núm. 2, pp. 114-125.
- \_\_\_\_\_. (2000). "On the Reduction of Broadcast Redundancy in Mobile Ad Hoc Networks", en *Proceedings of the 1st ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (MobiHoc)*, Boston, MA, USA, pp. 129-130.
- Qayyum, A.; Viennot, L. y Laouiti, A. (2000). "Multipoint Relaying: An Efficient Technique for Flooding in Mobile Wireless Networks", INRIA, Research Report.
- Ros, F. J.; Ruiz, P. M. y Stojmenovic, I. (2012). "Acknowledgment-Based Broadcast Protocol for Reliable and Efficient Data Dissemination in Vehicular Ad Hoc Networks", en *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 11, núm. 1, pp. 33-46.
- Salvo, P.; De Felice, M.; Cuomo, F. y Baiocchi, A. (2012). "Infotainment traffic flow dissemination in an urban VANET", en *Proceedings of the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Anaheim, CA, USA, pp. 67-72.
- Sanguesa, J. A.; Fogue, M.; Garrido, P.; Martínez, F. J.; Cano, J. C.; Calafate, C. T. y Manzoni, P. (2015). "RTAD: A real-time adaptive dissemination system for VANETS", en *Computer Communications*, vol. 60, pp. 53-70.
- Schoch, E., F. Kargl, M. Weber y T. Leinmuller (2008). "Communication patterns in VANETS", en *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, núm. 11, pp. 119-125.
- Sucec, J. y Marsic, I. (2000). "An efficient distributed network-wide broadcast algorithm for mobile ad hoc networks", Rutgers University, Reporte Técnico.
- Tonguz, O. K.; Wisitpongphan, N. y Bai, F. (2010). "DV-CAST: A distributed vehicular broadcast protocol for vehicular ad hoc networks", en *IEEE Wireless Communications*, vol. 17, núm. 2, pp. 47-57.

- Viriyasitavat, W.; Tonguz, O. K. y Bai, F. (2011). "UV-CAST: an urban vehicular broadcast protocol", en *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, núm. 11, pp. 116-124.
- Williams, B. y Camp, T. (2002). "Comparison of broadcasting techniques for mobile ad hoc networks", en *Proceedings of the 3rd ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking & computing (MobiHoc)*, Lausanne, Switzerland, pp. 194-205.



# Simulación de una VANET como solución al tráfico vehicular de la ciudad de Quito

| DANIEL CAIZA, CHRISTIAN TIPANTUÑA, MARTHA CECILIA PAREDES PAREDES\*  
| ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL (EPN), QUITO, ECUADOR

## INTRODUCCIÓN

El centro histórico de la ciudad de Quito es víctima del colapso vehicular por el intenso tráfico que soporta al ser un sector importante de la ciudad y la conexión entre las zonas sur y norte. Al considerar que el parque automotor de Quito ha rebasado los límites permitidos en áreas metropolitanas (*EL NORTE*, 2013), se han adoptado soluciones como el Pico y placa (Carrión Mena, 2010); no obstante, estas medidas no han logrado su objetivo planteado sino que, por lo contrario, han incrementado el problema.

Utilizar una solución tecnológica como las redes vehiculares *ad hoc* (VANET), resulta una opción atractiva para disminuir el tráfico vehicular; sin embargo, implementar una red sin una simulación previa implica realizar inversiones para adquirir, comprar e instalar los equipos necesarios y solicitar permisos sin visualizar claramente el comportamiento de la red y sin analizar los requisitos y las características.

En general, la simulación de redes de datos ha tenido un gran desarrollo. En el caso específico de VANET, es necesario el uso tanto de un simulador de red como uno de movilidad, que trabajen en tiempo real y con el mismo lenguaje de programación.

Veins es un *software* de simulación híbrido, de código abierto (Sommer, German y Dressler, 2011), que permite la comunicación bidireccional de los simuladores SUMO (*Simulation of Urban MObility*) (SUMO, 2016) y OMNET++ (*Objective Modular Network Testbed*) (OMNET++, 2015). Por un lado, SUMO permite crear el entorno de movilidad urbano, utiliza el lenguaje de progra-

\* Correos electrónicos: marco.caiza@epn.edu.ec, christian.tipantuna@epn.edu.ec, cecilia.paredes@epn.edu.ec

mación C++ y maneja archivos que pueden ser generados sistemáticamente mediante comandos; y, por el otro, OMNET++ se encarga de la comunicación de la red VANET, permite el control de tiempo y el monitoreo de los paquetes transmitidos. Veins permite trabajar a estos simuladores sincronizadamente en dos pantallas que tienen correspondencia tanto en tiempo como en el movimiento de los vehículos involucrados, de manera que resulta muy didáctico crear una VANET y comparar sus resultados.

En el presente trabajo se describe el diseño y la simulación de una red VANET para el centro histórico de la ciudad de Quito usando Veins, SUMO y OMNET++.

## TRABAJOS AFINES

En las siguientes líneas se realiza una revisión breve de trabajos afines, para lo cual se han considerado proyectos desarrollados tanto nacional como internacionalmente. En la mayoría de los trabajos encontrados en la literatura, las simulaciones se realizan solamente de modelos de movilidad básicos que comprenden una zona geográfica mínima, es decir, que solo considera un par de intersecciones. Estos trabajos son realizados simplemente para comprobar la transmisión de datos entre vehículos y la activación de algunas alertas por colisión.

En el trabajo presentado en Aucancela Palaguachi y Espinoza Tenempanguay (2015) por la Universidad Politécnica Salesiana (Cuenca, Ecuador), se realiza un análisis de factibilidad para crear una red vehicular inteligente integrando una red *ad hoc* con una red LTE (*Long Term Evolution*), para lo cual se recopila información estadística detallada de las causas de accidentes en las principales carreteras de Ecuador. Además, el estudio incluye la descripción de varios componentes y protocolos empleados por la red VANET. El diseño y la simulación de la red se lleva a cabo con los simuladores SUMO, NS2 y NS3, y el área analizada está formada solamente por cuatro intersecciones. Los resultados que se pueden extraer son muy restringidos, ya que dicho estudio se limita a la factibilidad de simulación de una VANET.

Un proyecto realizado en 2012 por la Universidad Carlos III, de Madrid, presenta un estudio sobre el simulador híbrido de redes vehiculares Veins (González Ripoll Cerezo, 2012). En dicho estudio se demuestra que los simuladores de redes vehiculares son una solución viable para el tráfico en ciudades y carreteras. Además, se muestra que Veins sobresale por encima de otros

simuladores. Así, TraNS (Piórkowski *et al.*, 2008) comparado con Veins no considera el control de intervalos de tiempo entre sus componentes y no se ha actualizado en los últimos años. MobIREAL (Higashino, 2009) permite simular una amplia variedad de redes móviles *ad hoc*; sin embargo, es un programa bajo licencia cuya última versión fue en 2009, lo que limita su uso. GrooveNET (Network Simulation Tools Project Team, 2017) representa a los simuladores de tipo integrado (manejan un solo mecanismo para red y movilidad) que son considerados inferiores a los híbridos, a razón de verse obligados a simplificar la interacción de sus componentes para movilidad y red, degradando la calidad de la simulación (González Ripoll Cerezo, 2012). El resto del trabajo se enfoca en la descripción de los programas que componen Veins, en la instalación de los mismos y en la programación necesaria para crear una simulación. Además se realiza un ejemplo básico de una simulación, que solamente considera el cruce de dos vías principales, con el fin de comprobar el buen funcionamiento de los programas instalados.

## SIMULADORES EMPLEADOS

Para simular una VANET, es necesario usar al menos un simulador de tráfico vehicular, un simulador de red y un vínculo entre ambos. Para la evaluación en el centro histórico de Quito se ha seleccionado SUMO como simulador del tráfico vehicular, OMNET++ para la red de comunicaciones y Veins como el vínculo entre los dos. Para asegurar la compatibilidad de los simuladores, se han seleccionado las versiones SUMO v0.25, OMNET++ v5.0 y Veins v4.2. Cada uno de estos simuladores se detalla a continuación.

## SUMO

SUMO es un simulador de movilidad urbana desarrollado en lenguaje C++ que permite crear e importar mapas y se fundamenta en la identificación de nodos con un número que representa la latitud y la longitud bajo el sistema de coordenadas WGS84.<sup>1</sup> Para unir estos nodos se emplean aristas que simbolizan las calles, las cuales se usan *a posteriori* para fijar el inicio, los puntos intermedios

<sup>1</sup> WGS84 es el Sistema Geodésico Mundial de 1984. Es un sistema estándar en el nivel mundial para cartografía, geoposicionamiento y navegación.

Figura 1. Interfaz y herramientas de SUMO



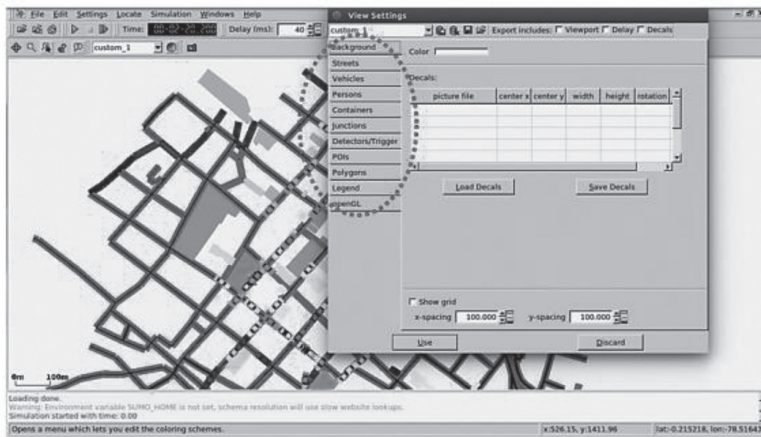
y el fin de un trayecto; eso se debe a que los vehículos programados toman una ruta determinada con el modelo de coche seguidor<sup>2</sup> que usa la numeración de aristas secuenciales en el mapa o un camino aleatorio según se desee.

El generador de movilidad presenta una interfaz amigable con herramientas para el monitoreo y el control del tiempo de ejecución, el cual incluye una zona especial para generar un retardo entre 0 y 100 ms, lo que facilita visualizar, con mayor detalle, el movimiento de los vehículos en las rutas establecidas. Para observar el comportamiento particular de un vehículo, el simulador tiene la opción de acercamiento sin necesidad de interrumpir la reproducción, y también posee un sistema de múltiples ventanas que permiten visualizar al mismo tiempo el mapa general y un área seleccionada, como se observa en la figura 1.

La ventana de configuración visual de SUMO permite variar parámetros como fondo de pantalla, calles, número de vehículos, nodos, semáforos, puntos poligonizados (POIS), etcétera, como se muestra en la figura 2. De estos, los más utilizados son las variaciones de vehículos y POIS. De ahí, las variaciones que se pueden realizar a los vehículos son el tamaño en que se puede visualizar el número del nodo móvil, el color de los vehículos y la opción de mantener el tamaño del vehículo constante aún después de aplicar enfoque o desenfoco.

<sup>2</sup> Coche seguidor: es un robot móvil que sigue una trayectoria recta por una línea recta.

Figura 2. Configuración de visualización en SUMO



En el caso de requerir información extra en el mapa, como ubicación de equipos RSU (*Road-Side Unit*) o sitios destacados de la ciudad, SUMO ofrece en la sección de POIS la opción para visualizar nombres, identificativos y variar el color de los dispositivos fijos.

La instalación de SUMO puede llevarse a cabo desde el centro de administración de Ubuntu o mediante comandos; sin embargo, con estos métodos solamente se instalará la última versión de SUMO vo.28. Por temas de compatibilidad de Veins, es necesario trabajar con SUMO vo.25, por lo que a continuación se presenta la secuencia de comandos para la instalación y la solución de posibles errores generados:

- Descargar el archivo *sumo-src-0.25.0.zip* de la página: <https://sourceforge.net/projects/sumo/files/sumo/version%200.25.0/>
- Crear una carpeta para instalar SUMO, copiar y descomprimir el archivo .zip. Recordar que se necesita permiso de administrador:
 

```
$ sudo su
$ mkdir /home/sumowork
```
- Dirigirse a la carpeta creada para SUMO:
 

```
$ cd /home/sumowork/sumo-0.25.0
```
- Ejecutar los siguientes comandos para configurar e instalar SUMO. Debe esperar que concluya cada proceso:
 

```
$ ./configure
```

```
$ make
$ make install
```

- En caso de encontrar errores en el proceso de instalación, es probable que la actualización del sistema operativo deseche paquetes antiguos necesarios para el simulador; para solucionarlo se ejecuta:

```
$ checkinstall
```

Con esta instrucción se genera una versión .deb del instalador y se instalan los paquetes necesarios.

- Ejecutar el instalador .deb:
 

```
$ dpkg -i sumo-0.25.0.deb
```
- Finalmente, desde el terminal comprobar la instalación:
 

```
$ sumo -version
```
- Para ejecutar SUMO, debe ingresar la siguiente línea de comandos:
 

```
$ sumo -gui -c centro.sumo.cfg
```

## OMNET++

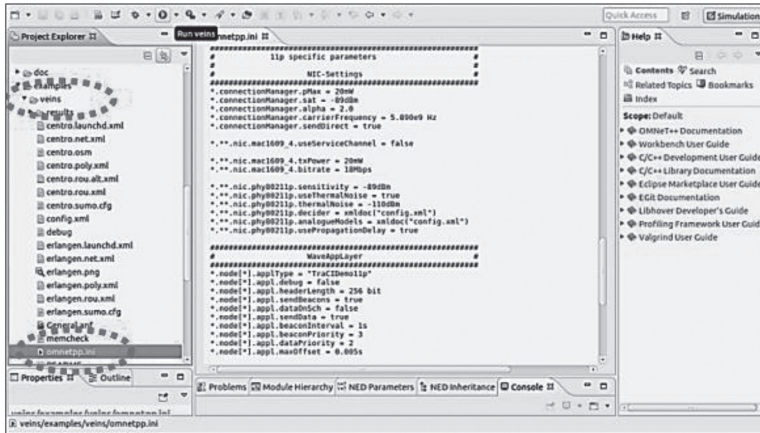
OMNET++ es un simulador de redes de eventos discretos abierto al público desde 1997, con librerías y módulos que usan conceptos de programación orientada a objetos en C++. Trabaja con módulos simples para formar otros complejos; las topologías se simulan con un lenguaje propio de OMNET llamado NED. Maneja tres parámetros importantes: a) tasa de error, b) tiempo de propagación y c) tasa de transferencia de información (González Ripoll Cerezo, 2012).

Para la simulación de redes en OMNET++, el paquete encargado de los diferentes protocolos de comunicación en las capas superiores de redes inalámbricas es INET, mientras que MIXIM es un *framework* que se encarga de la interfaz con INET además del modelado de las capas de enlace y física. Con la versión 5.0 de OMNET++, al integrar con Veins v4.2, los *frameworks* INET y MIXIM se instalan por defecto.

En la figura 3 se presenta el entorno de OMNET++ v5.0, que cuenta con los elementos necesarios para compilar un proyecto NED. Se puede observar en la ventana de exploración de proyectos (ubicada a la izquierda) la carpeta Veins en la que se encuentran los archivos SUMO y algunos otros vinculados a la VANET. El archivo *omnetpp.ini* contiene los datos de configuración de la red.

Los requerimientos y comandos necesarios para la instalación de OMNET++ v5.0 en el Sistema Operativo Ubuntu v16.04, se presentan a continuación:

Figura 3. Entorno de OMNeT++ v5.0



- Instalar varios paquetes necesarios para el funcionamiento de OMNeT++, con el siguiente comando:  
`$ build-essential, gcc, g++, bison, flex, perl, tcl-dev, tk-dev, blt, libxml2-dev, zlib1g-dev, openjdk-6-jre, doxygen, graphviz, openmpi-bin, libopenmpi-dev, libpcap-dev`
- Descargar el instalador de OMNeT++ v5.0 de la página oficial:  
<https://omnetpp.org/omnetpp>
- Desde un terminal, crear una carpeta para la instalación del programa:  
`$ mkdir omnetpp`
- En la carpeta omnetpp creada, copiar el archivo descargado:  
`$ cp omnetpp-5.0-src.tgz ../omnetpp`
- Descomprimir el instalador:  
`$ tar xvfz omnetpp-5.0-src.tgz`
- En la carpeta de instalación descomprimida omnetpp-5.0, ejecutar el comando para definir las variables de entorno:  
`$ setenv`
- Editar el archivo bashrc e incluir la siguiente línea de comandos:  
`gedit ~/.bashrc`  
`export PATH=$PATH:$HOME/omnetpp/omnetpp-4.6/bin`
- Ejecutar el archivo de configuración de la instalación:  
`./configure`

- En el directorio `omnetpp/omnetpp-5.0`, ejecutar el comando `make`:  
`make MODE=release`

Además, se necesitan instalar algunos componentes para la interfaz gráfica; los detalles e instalación para diferentes sistemas operativos se encuentran en el manual del programa de la página oficial de OMNET++.

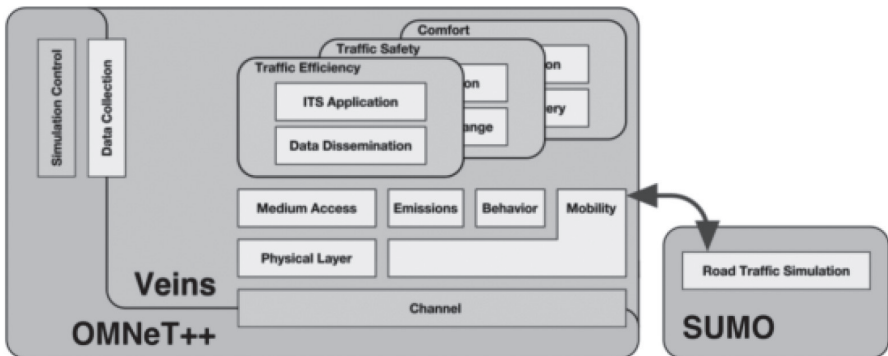
## VEINS

Veins es el vínculo entre SUMO y OMNET++, de tipo híbrido y código abierto, desarrollado por el grupo de trabajo de Christoph Sommer en la Universidad de Erlangen-Nuremberg (Alemania). Para el presente proyecto, se instala Veins v4.2, el cual no requiere instalar por separado el *framework* MIXIM gracias al vínculo que se encuentra en la carpeta Veins. La relación que tienen los programas se muestra en la figura 4.

Se puede trabajar a partir del ejemplo que Veins incluye por defecto, se substituyen los 8 archivos correspondientes a la movilidad en SUMO (ver figura 8) y se edita uno extra (`centro.launchd.xml`) que incluye la información para crear el vínculo con OMNET++, como se indica a continuación:

```
<!-- debug config -->
<launch><copy file="centro.net.xml"/>
```

Figura 4. Relación con los componentes de Veins



Fuente: Sommer, 2016.

```
<copy file="centro.rou.xml"/>
<copy file="centro.poly.xml"/><copy file="centro.sumo.cfg" type="config"/>
</launch>
```

El siguiente paso consiste en modificar el tiempo de SUMO para acoplarlo a Veins; esto se logra al incluir en el archivo *centro.sumo.cfg* el tiempo de Veins, que tiene la siguiente forma:

```
<time>
<begin value="0"/>
<end value="1000"/>
<step-length value="0.1"/>
</time>
```

Para compilar el proyecto en la carpeta de ejemplos de Veins, es necesario editar el archivo *omnetpp.ini* en el campo de *TraCI Scenario Manager parameters*, para que se ejecute con el archivo generado para el proyecto (*centro.launchd.xml*); este procedimiento se realiza en la siguiente línea:

```
*.manager.launchConfig = xmldoc("centro.launchd.xml")
```

Los archivos de Veins que se modificaron para este proyecto se pueden descargar de la plataforma *GibHub* en el enlace <https://goo.gl/zYkpV>. El archivo *omnetpp.ini* se adjunta en el repositorio e incluye secciones para configurar la interfaz con el usuario al activar o desactivar diferentes funciones y parámetros; las secciones más importantes son:

- *TraCIScenarioManager parameters* que administra el archivo de carga *launchConfig* y el puerto 9999 que realiza el vínculo con SUMO.
- *RSU SETTINGS* para configurar el número de unidades fijas (RSU) en carretera y sus posiciones en el *display*.
- *11p specific parameters and NIC-Settings* permite administrar parámetros como potencia, frecuencia portadora, velocidad de trama, sensibilidad tanto para capa física como para subcapa MAC, como se muestra a continuación:

```
*.connectionManager.pMax = 20mW
*.connectionManager.sat = -89dBm
*.connectionManager.alpha = 2.0
```

```

*.connectionManager.carrierFrequency = 5.890e9 Hz
*.connectionManager.sendDirect = true
*.*.nic.mac1609_4.useServiceChannel = false
*.*.nic.mac1609_4.txPower = 20mW
*.*.nic.mac1609_4.bitrate = 18Mbps
*.*.nic.phy80211p.sensitivity = -89dBm
*.*.nic.phy80211p.useThermalNoise = true
*.*.nic.phy80211p.thermalNoise = -110dBm

```

- *Mobility* para configurar la generación de accidentes.

La ventana de Veins se abre al compilar y ejecutar la carpeta del proyecto en la interfaz de OMNeT++. En la figura 5 se presenta el entorno de simulación de Veins, mostrando en la figura 5a el entorno de movilidad, y en la figura 5b la simulación de la red de datos con diferentes opciones para el control del tiempo de reproducción, así como los botones de inicio y parada, una opción de reproducción rápida en la que se omite la visualización del intercambio de paquetes entre nodos y un botón para mayor velocidad en el que la prioridad es observar la movilidad vehicular; además, se dispone de una opción para reproducir la simulación hasta un evento determinado. Todos los eventos de la simulación se pueden observar en una línea de tiempo ubicada en la parte superior de la interfaz.

Figura 5. Entorno de simulación de Veins



a) Ventana de movilidad

b) Ventana de comunicación de la red

Una vez realizada la instalación de SUMO v0.25 y OMNET++ v5.0, es necesario descargar el paquete de instalación de Veins 4.0, o superior, desde su página oficial (Sommer, 2016). El paquete se debe descomprimir en la carpeta de instalación del simulador de red. Una vez realizado esto, se abre el simulador OMNET++ y en su interfaz gráfica secuencialmente se seleccionan las siguientes opciones: *File – Import – General – Exiting Project Into Workspace*. Finalmente, se escoge el archivo de Veins que contiene, a partir de la versión 4.0, los paquetes necesarios de INET y MIXIM que se compilan e importan automáticamente.

## SIMULADORES EMPLEADOS

En esta sección se realiza el diseño de la VANET para el centro histórico de la ciudad de Quito. El diseño requiere consideraciones por separado para la movilidad y la comunicación de la red. Se debe iniciar con el diseño de movilidad, considerando una intensidad de tránsito vehicular lo más cercana a la situación real de la ciudad; luego, se debe diseñar la red de comunicación, instalar las unidades fijas de transmisión (RSU) en el área geográfica y, finalmente, simular la red VANET para determinar el comportamiento y el rendimiento de la misma.

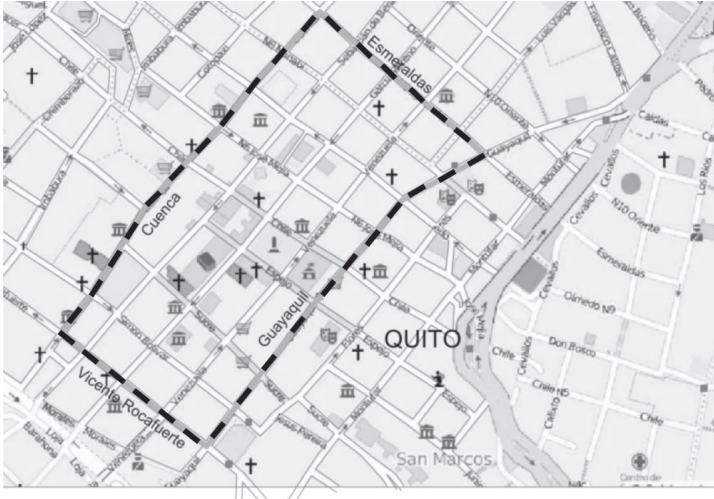
### Requisitos

Para el diseño se seleccionó una zona del centro histórico de la ciudad de Quito con un perímetro aproximado de 2,4 km. Esta dimensión resulta ser suficiente para trabajar sin comprometer el rendimiento de los simuladores, pero es lo bastante amplia para colocar un número considerable de RSU alrededor de las vías y de los vehículos para simular de esta manera un alto tráfico y permitir a la VANET aplicar soluciones como la generación de rutas alternas. El área seleccionada está delimitada por las calles Vicente Rocafuerte, Cuenca, Esmeraldas y Guayaquil, tal como se indica en la figura 6.

Los medios empleados para el diseño involucran *hardware*, *software* y recursos de información. Estos medios se resumen en la siguiente lista, y más adelante se describe el uso de los mismos.

- Computador personal: Intel Core i5, 2.50 GHz y RAM de 6 GB.

Figura 6. Área de análisis del centro histórico de Quito



Fuente: OpenStreetMap Foundation, 2016.

- Sistemas operativos: *Windows 10* para AutoCAD y *Ubuntu 16.04* para la simulación.
- Programas: SUMO v0.25, OMNET++ v5.0 (con los *frameworks* INET, MiXiM y Veins), *OpenStreetMap*, *Google Maps* y AutoCAD 2D.

## Diseño del Tránsito Vehicular

La intensidad del tráfico de Quito, en horas pico, se obtuvo desde *Google Maps* (Google, 2016). En la figura 7 el grosor de las vías describe el nivel de congestión vehicular existente. Vías más gruesas corresponden a lugares más congestionados (rojo en la aplicación) y líneas más finas representan un movimiento más fluido de vehículos (verde en la aplicación).

Para crear el tránsito vehicular, SUMO permite importar mapas en lugar de generarlos desde cero. Se utiliza *OpenStreetMap*<sup>3</sup> porque maneja información pública y es *opensource*. Para importar el mapa, se ubica el área requerida en

<sup>3</sup> *OpenStreetMap*: proyecto lanzado en 2004 para crear mapas virtuales sin licencia apoyado por colaboradores (OpenStreetMap Foundation, 2016).

**Figura 7. Intensidad del tráfico vehicular en el centro histórico de Quito**

Fuente: Google, 2016.

*OpenStreetMap* y se selecciona la opción exportar, con lo que se descargará automáticamente un archivo de extensión *.osm* que debe ubicarse en una carpeta de SUMO (*home/sumowork*); este archivo se debe transformar a la base de red para SUMO con el nombre de *centro.net.xml*, mediante la siguiente línea de comandos:

```
$ netconvert --osm-files centro.osm -o centro.net.xml
```

El siguiente paso es crear el archivo *typemap.xml* que contiene la descripción general de elementos típicos encontrados en un mapa de movilidad como parques, edificios importantes, puntos turísticos, zonas con agua, parqueaderos, etcétera. Toda esta información incluye a los identificadores (ID) que se visualizan en el mapa como un texto descriptivo para cada estructura. Los nombres de los elementos en el mapa son *water, sport, forest, natural, park, leisure, tourism, landuse, residential, commercial, industrial, shop, building, amenity, parking, military, farm, power, land, boundary.administrative, aeroway, aerialway, historic*.

Subsecuentemente, para importar el mapa es necesario describir los colores para cada elemento utilizando códigos de colores RGB (*red, green, blue*) y finalmente especificar las capas de cada elemento para identificar el solapamiento entre ellos; todo esto se introduce gracias a las varias líneas de código del archivo *typemap.xml*, que son un aporte de los colaboradores que experimentan con SUMO. El archivo tiene la estructura que se muestra a continuación:

```
<polygonTypes>
<polygonType id="park" name="park" color=".81,.96,.79" layer="-11"/>
```

<polygonTypes>

El archivo *centro.poly.xml* describe mediante polígonos y puntos cada uno de los elementos referenciales que existen en el entorno, gracias a la información de *OpenStreetMap* actualizada por usuarios o colaboradores mediante GPS (*Global Positioning System*). Dichas características se exportan junto con el mapa *centro.osm*. Para generar el archivo *centro.poly.xml*, en una ventana terminal se usan los archivos previos *centro.osm*, *centro.net.xml* y *typemap.xml*; para esto se ejecuta un convertidor a polígonos con la siguiente línea de código:

```
$ polyconvert --net-file centro.net.xml --osm-files centro.osm --type-file type-
map.xml -o centro.poly.xml
```

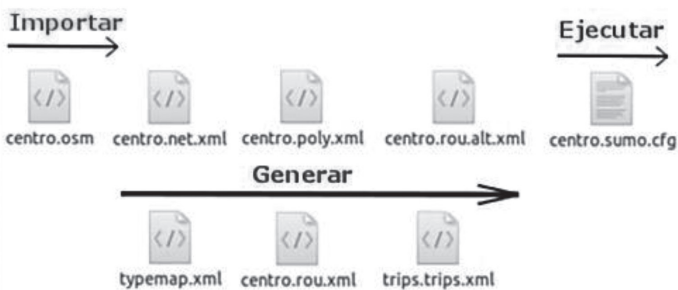
A continuación, se debe ubicar el archivo *Trips.py* (archivo de Python) y copiar el archivo y su dirección (usualmente la ruta por defecto es */usr/share/sumo/tolos/randomTrips.py*) en la carpeta creada para los ficheros de SUMO y editar para crear al menos 100 vehículos con rutas aleatorias en las calles. Este procedimiento se realiza de la siguiente manera:

```
$ python /usr/share/sumo/tools/ randomTrips.py -n centro.net.xml -e 100 -l
```

Luego, se debe crear un archivo con las rutas aleatorias que seguirán los vehículos mediante la siguiente línea de comandos:

```
$ python /usr/share/sumo/tools/randomTrips.py -n centro.net.xml -r centro.
rou.xml -e 100 -l
```

**Figura 8. Archivos generados para SUMO**



Todos los documentos necesarios para ejecutar el simulador de movilidad urbana se pueden descargar de la plataforma GitHub en el siguiente enlace <https://goo.gl/2zy24K>; la figura 8 resume todos los archivos mencionados. Para evitar conflictos por paquetes y actualizaciones de la interfaz gráfica, se sugiere correr el simulador desde una pantalla terminal ubicándose en la dirección del proyecto generado, con la siguiente línea de comandos:

```
$ sumo-gui -c centro.sumo.cfg
```

Las rutas aleatorias creadas para 100 vehículos son de gran ayuda para comprobar el buen funcionamiento del simulador en un inicio. Sin embargo, para emular el comportamiento de los vehículos en condiciones de tráfico reales, como se muestra en la figura 7, es necesario observar las calles principales con intensidad de tráfico y generar una carga de vehículos razonable para realizar un estudio. La tabla 1 describe con un código de símbolos el uso de 15 rutas, de las cuales nueve son programadas para recorrer las calles principales. Se consideran estos trayectos como rutas típicas por ser mayormente utilizadas por los usuarios, mientras que las rutas restantes son aleatorias.

La programación del camino que siguen los vehículos puede realizarse de manera independiente para cada vehículo o para un grupo de vehículos. Para distribuir los números de identificación de los 100 vehículos empleados, identificados del 0 al 99, se emplea un triángulo mágico invertido, como se muestra en la tabla 1. Con esta distribución se consigue que el número identificador no se repita y que los vehículos sean distribuidos en las 15 rutas, generando tráfico vehicular en toda el área de análisis. Adicionalmente, cabe indicar que el orden de partida de los autos está relacionado con su número identificador.

Como se puede ver en la tabla 1, el 14 % de los móviles se distribuyen en la ruta 0, es decir, 14 vehículos con asterisco (\*) seguirán únicamente la calle Venezuela. Para lograr este propósito, es necesario editar la ruta de cada uno de los vehículos programados de acuerdo con el identificador de aristas que corresponden a los bloques que son parte de esta vía, tal como se puede observar en la figura 9.

Debido a que el simulador maneja la idea del coche seguidor, todos los vehículos que lleven la secuencia de aristas y nodos que trazan una ruta determinada tomarán el mismo camino sin desviarse. De igual manera, se planifica el trayecto de las rutas restantes con sus correspondientes calles, líneas de programación y símbolos con los que serán identificadas en la simulación de movilidad.

TABLA I. Porcentaje, símbolo e id de vehículos en rutas programadas.

Ruta	Sím- bolo	Por- centaje	Identificador de vehículo													
0	*	14 %	0	2	6	12	20	30	40	50	60	70	80	88	94	98
1	★	14 %	1	3	7	13	21	31	41	51	61	71	81	89	95	99
2	▲	12 %	4	8	14	22	32	42	52	62	72	82	90	96		
3	—	12 %	5	9	15	23	33	43	53	63	73	83	91	97		
4	●	10 %	10	16	24	34	44	54	64	74	84	92				
5	◆	10 %	11	17	25	35	45	55	65	75	85	93				
6	◆	8 %	18	26	36	46	56	66	76	86						
7	◆	8 %	19	27	37	47	57	67	77	87						
8	◆	6 %	28	38	48	58	68	78								
Alea- toria	◆	6 %	29	39	49	59	69	79								

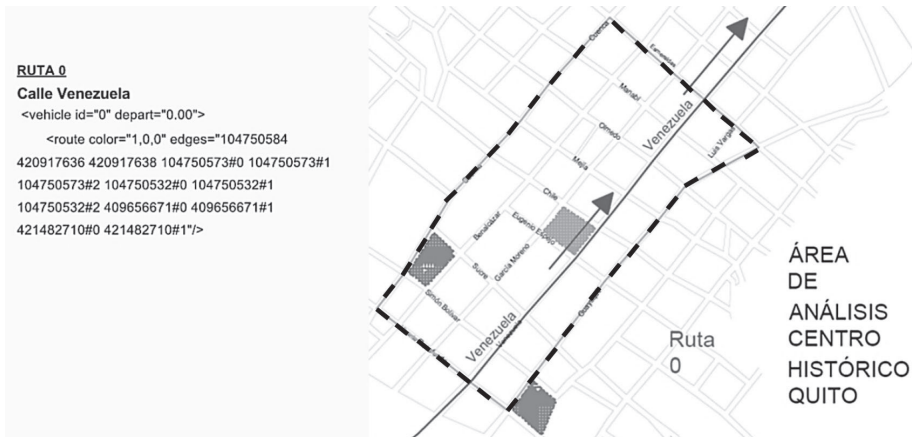
En la figura 10 se muestra el mapa del área de análisis creado en AutoCAD<sup>4</sup> para la ruta 4, el cual será utilizado como referencia para realizar mediciones de distancia y comparar las rutas programadas.

Como se indica en la tabla I, el número de vehículos que circulan por cada trayecto decrece a medida que el número de ruta aumenta, por lo cual se resalta desde la ruta 0 hasta la ruta 4 con varios símbolos para identificar su movimiento. A partir de la ruta 5, el número de vehículos es cada vez menor y los mismos se pintan de un color por defecto que puede variarse desde la ventana de configuración de visualizaciones de SUMO. Finalmente, se programan seis rutas aleatorias distintas que son tomadas por los vehículos (29, 39, 49, 59, 69, 79); estas rutas simulan, por ejemplo, el comportamiento de usuarios que están perdidos, de visita turística o simplemente quieren dar vueltas en su vehículo.

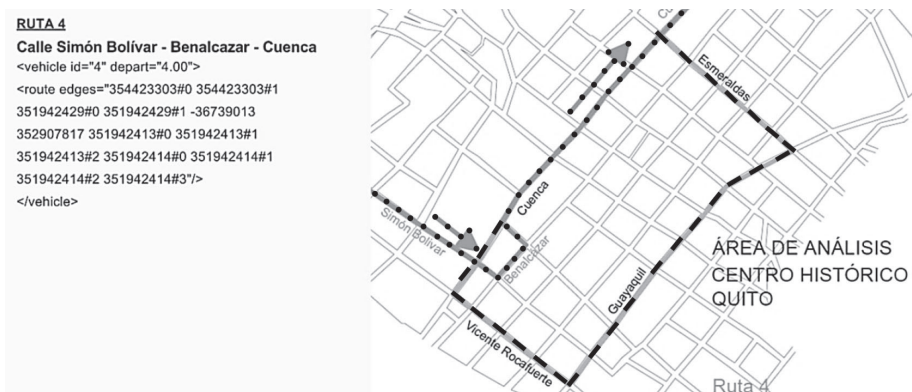
Una vez creados los 100 vehículos y las 14 rutas que recorren los mismos, se ejecuta SUMO y se configuran sus parámetros de visualización en el nivel macro (visualización completa del mapa) y en el micro (visualización de un vehículo en particular), esto para evitar interpretar accidentes por el hecho de ver coches demasiado unidos. Los eventos que se pretenden generar con

<sup>4</sup> AutoCAD: es un *software* de dibujo para realizar diseños en 2D y 3D que contiene herramientas suficientes para desarrollar diferentes esquemas, mapas y planos (Autodesk, 2016).

**Figura 9. Ruta 0, programada para vehículos marcados con asterisco (\*).  
(Programación de la ruta, plano georreferenciado de la ruta 0)**

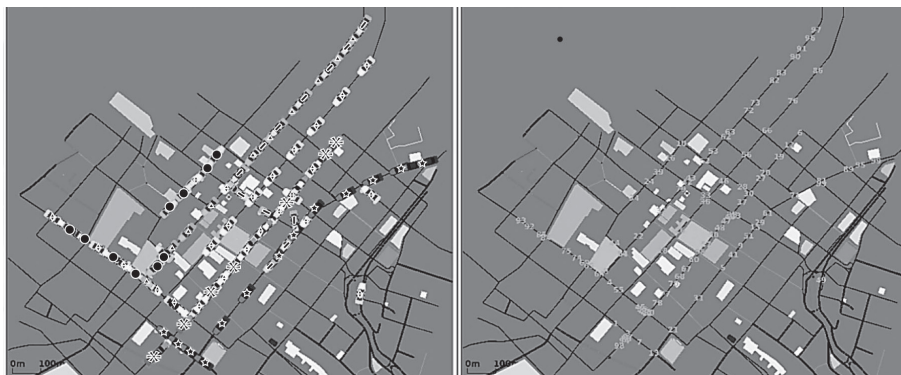


**Figura 10. Ruta 4, programada para vehículos marcados con estrella (★).  
(Programación de la ruta 4, plano georreferenciado de la ruta 4)**



el modelo de rutas son: a) largas colas de vehículos en espera, b) bajas velocidades debido al continuo frenado y arranque, y c) un efecto cuello de botella en varias zonas, como en la calle Benalcázar, de la ruta 3, debido al doble flujo. Todos estos eventos se pueden ver en la figura 11a y la representación numérica de cada vehículo puede observarse en la figura 11b.

**Figura 11. Generación de incidentes en la red de movilidad**



a) Identificación por símbolos

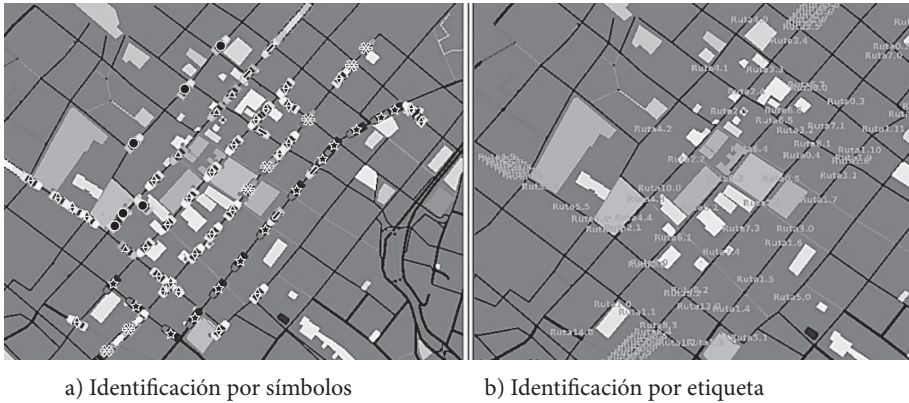
b) Identificación por etiqueta

Para facilitar la identificación de vehículos en SUMO, se modifica el archivo *centro.rou.xml* que contiene por defecto una programación extensa, con líneas de código para cada uno de los 100 vehículos. Como una opción más eficiente se utiliza la emisión de vehículos mediante flujo (*flow*<sup>5</sup>), que consiste en generar 15 rutas programadas y asociar un número de vehículos determinado (ver tabla 1). Las rutas creadas se identifican con un *route id*, que es un número entero y un color específico. Al utilizar la función *flow* se cambia el identificador de cada vehículo de un número entero a uno de tipo flotante, donde la parte entera describe la ruta y la parte decimal inicia el conteo de los vehículos, es decir, se podría iniciar desde .00, .01 o según se requiera. Las modificaciones realizadas en el archivo *centro.rou.xml* de SUMO para el caso de la ruta 0, con 14 vehículos, se muestran a continuación:

```
<route id="route0" color="1,0,0" edges="104750584 420917636 420917638
104750573#0 104750573#1 104750573#2 104750532#0 104750532#1 104750532#2
409656671#0 409656671#1 421482710#0 421482710#1"/>
<vType id="passenger/sedan" guiShape="passenger/sedan" accel="2.0" de-
cel="4.0" sigma="0.5" length="2.5" minGap="3.0" maxSpeed="50" >
<carFollowing-IDM/>
</vType>
```

<sup>5</sup> *Flow*: es una función en el entorno de SUMO para emisiones repetidas de vehículos en serie (SUMO, 2016).

**Figura 12. Mejora en la identificación de vehículos**



```
<flow id="Rutao" type="passenger/sedan" route="routeo" begin="0.00" period="3" number="14"/>
</routes>
```

En la figura 12b se observa la mejora significativa en la identificación de los vehículos en el mapa, pues en lugar de visualizar los números de la tabla 1, ahora se observa directamente el nuevo esquema de identificación. Por ejemplo, el identificador Ruta 0.00 indica que es el primer vehículo que circula por la ruta 0 y la etiqueta Ruta 0.13 representa al último vehículo en el mismo trayecto.

## DISEÑO PARA LA RED DE COMUNICACIÓN

Para la simulación de la VANET se ha considerado una comunicación V2I (*Vehicle to Infrastructure*). Por lo tanto, para crear la red vehicular bastaría con dos nodos móviles que cuenten con unidades a bordo OBU (*On-Board Unit*) y que se encuentren en un rango de alcance común. Sin embargo, para trabajar con los 100 vehículos, es necesario colocar RSU en sitios estratégicos para comunicar zonas lejanas y extender las redes *ad hoc* formadas. En la VANET, cada vehículo que ingresa al sector simulado inmediatamente reporta su presencia y los eventos que se presentan en su trayecto; además, informa las condiciones de tráfico que reportan los nodos vecinos.

Para establecer las posiciones de las RSU y para que la simulación sea más realista, se tomaron como referencia las ubicaciones de los AP (*Access Point*) utilizados en el proyecto #QuitoTeConecta (servicio gratuito *Wi-Fi* del Distrito Metropolitano de Quito) (CONQUITO, 2016), tal como se muestra en la tabla II. El área de operación de #QuitoTeConecta en el centro histórico coincide con la zona establecida para el diseño de la VANET. La información del proyecto es abierta al público, y además cada AP se encuentra georreferenciado y dispone de la siguiente información:

- Número de RSU en la simulación.
- Número identificador en la red #QuitoTeConecta.
- La ubicación con calles en el mapa.
- Las coordenadas geográficas con latitud y longitud en grados decimales.

Para la selección de la RSU es necesario realizar un *print screen* al mapa de la zona de análisis, tomado de *OpenStreetMap* que se utilizó para generar los archivos de SUMO. A partir de este, se crea en AutoCAD un mapa denominado *Area.dwg* a fin de realizar un *site survey* de la red #QuitoTeConecta. En este archivo se crean diferentes líneas y capas para desarrollar un plano realista de la zona de análisis, se incluyen en el mapa los AP con su correspondiente información geográfica usando la información de georreferencias de la tabla II. Posteriormente, se realiza un mapeo con el plano generado en AutoCAD en el entorno gráfico de SUMO, aprovechando que las coordenadas  $x$  y  $y$  coinciden en ambos programas.

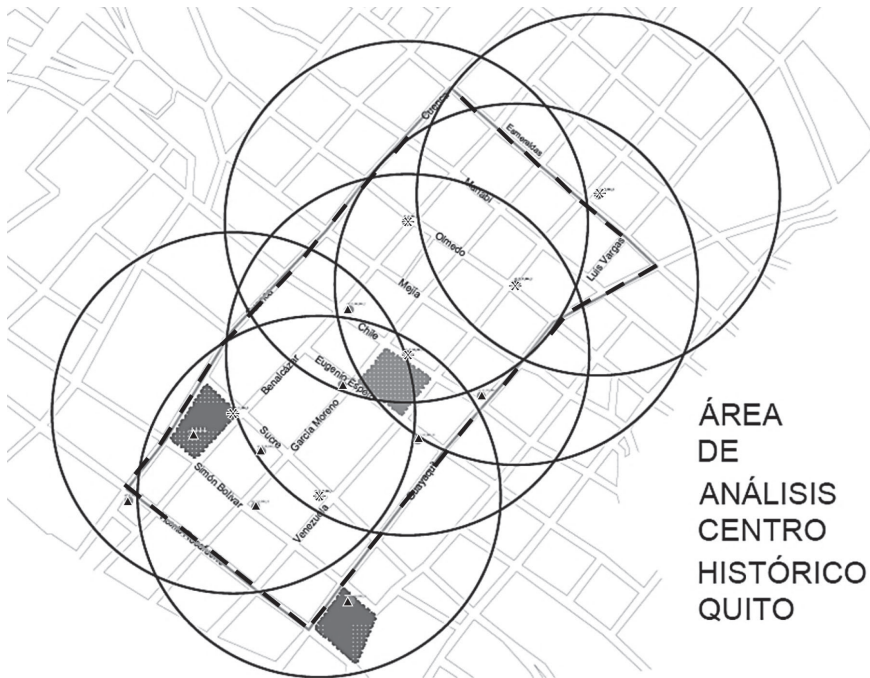
En el mapa georreferenciado se representan las RSU con un alcance de aproximadamente 300 m de radio que se obtuvo mediante experimentación en el simulador Veins. Los radios se grafican para evitar solapamientos innecesarios por distancias demasiado cortas entre dispositivos, evitando así redundancia de información y un incremento de latencia para los paquetes transmitidos en la red, cada vez que se actualiza la VANET en búsqueda de soluciones para los eventos dados. Como resultado, se obtiene el mapa georreferenciado que se muestra en la figura 13, donde el asterisco (\*) muestra la ubicación de las RSU seleccionadas, en tanto que las RSU descartados se marcan con un triángulo (▲); la imagen del mapa exportado en *OpenStreetMap* y los archivos de AutoCAD generados pueden ser descargados del repositorio en *GitHub* <https://goo.gl/ov7Rv6>.

Para incluir las RSU en SUMO, se añade al archivo *centro.poly.xml* un punto para cada RSU con su identificador, nombre y posición según se muestra en

TABLA II. Ubicación de dispositivos RSU.

RSU	AP ID	Ubicación	Lat/long	SUMO x,y	OMNET
0	43	Plaza Benalcazar, Benalcazar y Olmedo	-0.2177251, -78.5119647	1027.82, 1134.37	1040.28, 600.88
1	29	Museo Casa Sucre, Sucre y Venezuela	-0.2218503, -78.5132253	883.67, 678.09	891.30, 1052.56
2	27	Venezuela y Olmedo	-0.2186639, -78.5102991	1209.65, 1030.50	1236.69, 715.13
3	17	Plaza San Francisco	-0.2206594, -78.5144967	742.29, 817.03	765.48, 915.97
4	35	Museo Camilo Egas, Venezuela y Esmeraldas	-0.2173174, -78.5090894	1344.94, 1179.14	1380.53, 575.58
5	243	Chile, entre García Moreno y Venezuela	-0.219723, -78.511905	1030.08, 913.61	1066.73, 826.51

Figura 13. Mapa georreferenciado del área simulada y alcance de RSU



la tabla II. Para esta tarea se emplea una instrucción que incluye un número identificador del punto insertado en el mapa, la leyenda con que se visualizará `AP#QTC_ID_35_RSU_4`, el código de color RGB que se le otorga y su respectiva capa de visualización, como se indica a continuación:

```
<poi id="589503716" type="AP#QTC_ID_35_RSU_4" color="255,0,0" layer="4.00" x="1344.94" y="1179.14"/>
```

Por otro lado, para añadir los dispositivos RSU al proyecto Veins en el *display* que corresponde a la red de datos, se editan los archivos `RSUexampleScenario.ned` y `Omnetpp.ini` que se encuentran en el directorio `omnetpp-5.0/veins/examples/veins/source`.

En el archivo `RSUexampleScenario.ned` simplemente se modifica el número de RSU que se requiere para reportar en el entorno de trabajo del escenario planteado; este procedimiento se realiza de la siguiente manera:

```
network RSUexampleScenario extends Scenario
{
    submodules:
        rsu[6]: RSU {
            @display("p=150,140;b=10,10,oval");
        }
}
```

En el archivo `Omnetpp.ini` se modifica la sección `RSU SETTINGS` para reportar las coordenadas de los seis dispositivos fijos que se utilizarán según la información de la tabla II, con el formato que se indica a continuación:

```
*.rsu[0].mobility.x = 1040.28
*.rsu[0].mobility.y = 600.88
*.rsu[0].mobility.z = 3
```

## SIMULACIÓN

A continuación, se presenta la simulación de dos escenarios: uno sin VANET y otro con VANET a fin de comparar y analizar el desempeño de la red.

## Escenario 1. Movilidad sin VANET

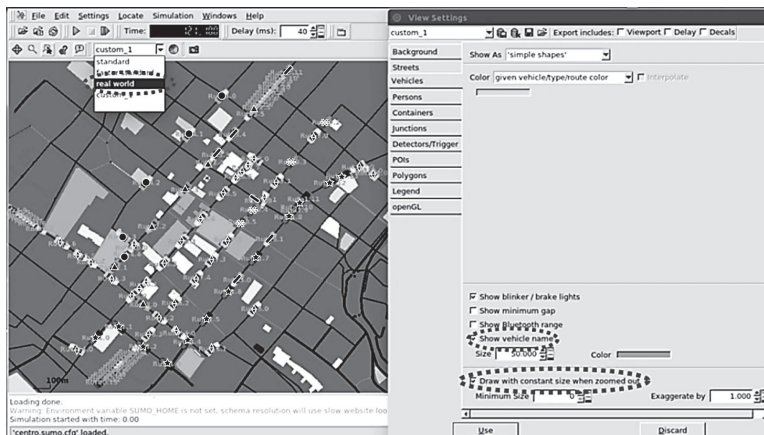
Para este escenario se emplea únicamente SUMO y se emulan las condiciones de tráfico ordinarias, tal como se muestra en la figura 7, empleando los archivos de la figura 8. Para este escenario se utilizan las rutas y porcentajes de vehículos de la tabla 1 y se emplea la función de SUMO *flow* para generar grupos de vehículos para cada ruta planteada.

Para ejecutar el programa, mediante una ventana terminal se direcciona a la carpeta que contiene el proyecto (*home/sumowork/centro*) y se ejecuta el siguiente comando:

```
§ sumo-gui -c centro.sumo.cfg
```

Una vez generada la pantalla de SUMO, se sugiere seleccionar la opción de mapa *real world* para tener una interfaz más amigable, y dado que el tiempo de simulación por defecto es muy corto y apenas de 1000 ms, es necesario seleccionar un retardo (*delay*) de 40 ms o superior para visualizar el tráfico a una velocidad moderada. Además, en las opciones de configuración de visualización de vehículos, *View settings – Vehicles – (Show vehicle name or Draw with constant size when zoomed out)*, se seleccionan las opciones para visualizar el nombre de los vehículos o la opción de dibujarlos con un tamaño constante al variar el *zoom*, tal como se puede apreciar en la figura 14.

**Figura 14. Visualización del mundo real en SUMO**



## Escenario 2. Movilidad con VANET

En este escenario se plantea la misma movilidad vehicular del escenario 1 más una red VANET, que incluye a seis RSU y una OBU por cada vehículo programado.

Al ejecutar el simulador OMNET++, se despliega una ventana que brinda la posibilidad de escoger o generar diferentes espacios de trabajo. Para utilizar el simulador Veins, se sugiere crear uno exclusivo y no incluir otras tareas, debido a que se pueden generar errores por nombres o archivos duplicados al construir el proyecto. Antes de correr Veins, es importante habilitar en segundo plano, mediante una ventana terminal, el proceso *launchd.py* que activa el puerto 9999 para vincular la comunicación con SUMO desde OMNET++; para esto, se debe direccionar a la carpeta que contiene el proyecto en */home/.../omnetpp-5.0/veins* y ejecutar el siguiente comando que incluye la ruta del archivo *sumo-launchd.py*:

```
$ python /home/.../omnetpp-5.0/veins/sumo-launchd.py -vv -c sumo-gui
```

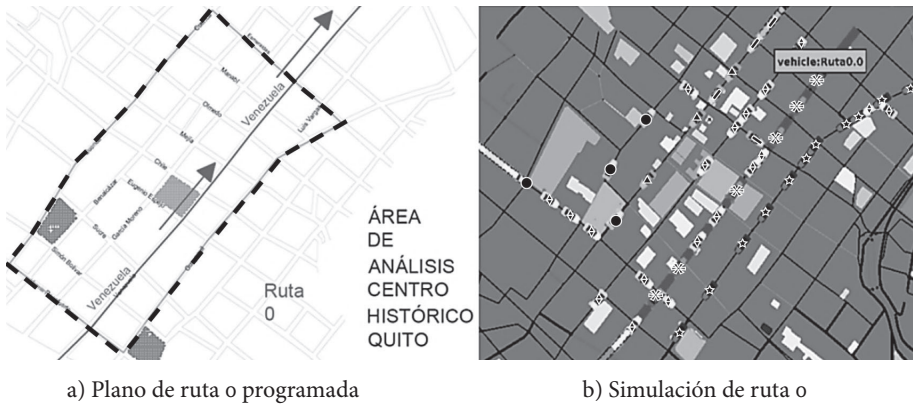
Para ejecutar Veins, se activa OMNET++, se habilita el puerto 9999, se ubica la carpeta Veins dentro del proyecto, se compila c y se ejecuta el programa; inmediatamente se despliega la pantalla con los controles de red y, posteriormente, al iniciar la simulación, aparece una pantalla secundaria con SUMO. Los archivos modificados en Veins para vincular SUMO, el archivo *centro.launchd.py*, así como los cambios necesarios para adicionar los dispositivos fijos RSU, pueden descargarse de la plataforma *GitHub* en el enlace <https://goo.gl/zYkpV>.

## RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones de los escenarios 1 (sin VANET) y 2 (con VANET) a fin de determinar el beneficio de uso de una VANET. En la figura 15 se observa la simulación de movilidad para la ruta 0 del escenario 1. Se compara con el plano desarrollado en AutoCAD (figura 15a) para demostrar la correspondencia de los mapas y comprobar que los vehículos cumplen tanto con la ruta programada como con la identificación de símbolos y nombres.

SUMO permite observar, en cualquier momento, los parámetros de vehículos que se encuentran en el mapa, de los cuales los más importantes son: el id de línea en que se encuentra el auto, la velocidad actual, la emisión de CO<sub>2</sub> (dióxido

Figura 15. Simulación de la ruta 0, escenario 1



de carbono) que produce, el ruido ambiental generado y la velocidad máxima a la que puede llegar el vehículo.

Por otro lado, los parámetros generales de la red en SUMO proveen información importante del entorno de movilidad como el número de vehículos que se encuentran activos, los vehículos que están por llegar y aquellos que ya llegaron a su destino, el número de colisiones que se produjeron, el número de nodos y aristas o líneas que tiene el mapa y su longitud en kilómetros. Estos parámetros se muestran en la figura 16a y con datos específicos del vehículo 10 en la ruta 0, en la figura 16b.

Para el escenario 2, con la VANET en funcionamiento, el resultado más relevante en Veins, gracias a la identificación por colores (marcados en este artículo con símbolos), es la variación de diferentes rutas para resolver problemas de movilidad. Entre los principales problemas de movilidad solventados con la VANET se tienen la disminución del tiempo de espera, producto de las largas colas en algunas intersecciones, e información disponible para evitar accidentes. Los cambios en el trayecto de los vehículos se detallan en la tabla III.

Las variaciones de rutas se generan cuando la red detecta un posible accidente en uno de los nodos que conforman la VANET. Cuando esto sucede, el nodo involucrado se señala con asterisco (\*); posterior a este evento, los vehículos cercanos se reportan al nodo emitiendo una alerta con su posición, la velocidad y la dirección. La información se difunde mediante los RSU a todos los dispositivos que se encuentran en el área de cobertura. Cada vez que se actualiza la VANET, actúa el módulo para el control de tránsito en SUMO

Figura 16. Parámetros en SUMO

network: Parameter		
Name	Value	Dynamic
loaded vehicles (#)	100	✓
insertion-backlogged vehicles (#)	0	✓
departed vehicles (#)	100	✓
running vehicles (#)	2	✓
arrived vehicles (#)	98	✓
collisions (#)	0	✓
teleports (#)	0	✓
end time (s)	1000	✗
begin time (s)	0	✗
step duration (ms)	39	✓
simulation duration (ms)	0	✓
idle duration (ms)	39	✓
duration factor ( )	-1.00	✓
ups (#)	-1.00	✓
mean ups (#)	135038.46	✓
nodes (#)	379	✗
edges (#)	412	✗
total edge length (km)	34.68	✗
total lane length (km)	36.97	✗
network version	0.25	✗

a) Parámetros de red

vehicle:Ruta0.1 Parameter		
Name	Value	Dynamic
lane (id)	421482710#1_0	✗
position (m)	88.86	✓
speed (m/s)	11.11	✓
angle (degree)	41.49	✓
time gap (s)	-1.00	✓
waiting time (s)	0.00	✓
Impatience	0.00	✓
last lane change (s)	0.00	✓
desired depart (s)	3.00	✗
depart delay (s)	0.00	✗
remaining (#)	13	✗
insertion period (s)	3.00	✗
stop info		✗
line		✗
Co <sub>2</sub> (mg/s)	1902.31	✓
CO (mg/s)	0.00	✓
HC (mg/s)	0.30	✓
Nox (mg/s)	2.90	✓
Pmx (mg/s)	0.11	✓
fuel (ml/s)	0.72	✓
noise (harmonoise) (db)	62.58	✓
devices		✗
persons	0	✓
containers	0	✓
parameters (key=val)		✗
		✗
Type information:		✗
type (id)	passenger/sedan	✗
length	4.50	✗
miniGap	3.00	✗
vehicle class	passenger	✗

b) Parámetros del vehículo ruta 0.1

denominado TRACI (*Traffic Control Interface*), que toma la decisión de mover los nodos de la red a otras líneas (vías) o mantenerlos en su ruta programada.

La figura 17 indica las modificaciones de la ruta 0 de acuerdo a la información mostrada en la tabla III. Los seis primeros vehículos con asterisco (\*) (ver figura 17a) siguen la trayectoria programada, ya que no existe ningún evento que lo impida. Los OBUS de los vehículos restantes, con id 0.06 a 0.10, reciben información de congestión en la calle Venezuela debido a que su transversal José Olmedo tiene una prioridad mayor. Bajo esta condición, los vehículos modifican su camino hacia la calle José Mejía y retoman la ruta con la calle José Olmedo (figura 17b). Los últimos vehículos con asterisco (\*) (ver figura 17c), a partir del vehículo con id 0.11, reciben el informe de congestión mucho antes que el segundo grupo, por lo que toman la solución más cercana, es decir la calle Simón Bolívar, para evitar el tramo de la calle Venezuela que reporta congestión.



**Figura 17. Comparación de ruta o programada y soluciones VANET**



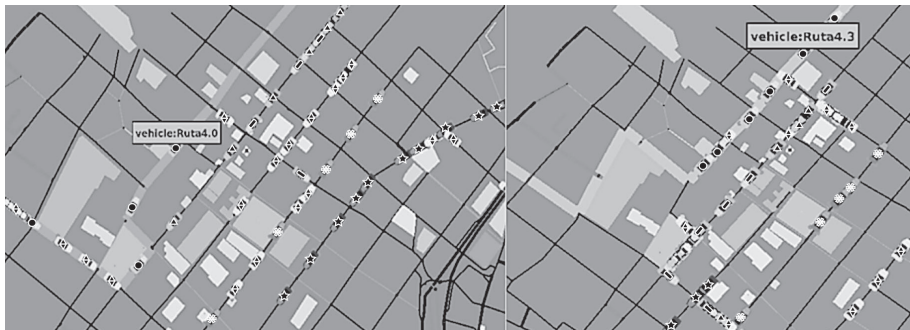
a) Ruta 4 programada

b) Solución VANET 1

c) Solución VANET 2

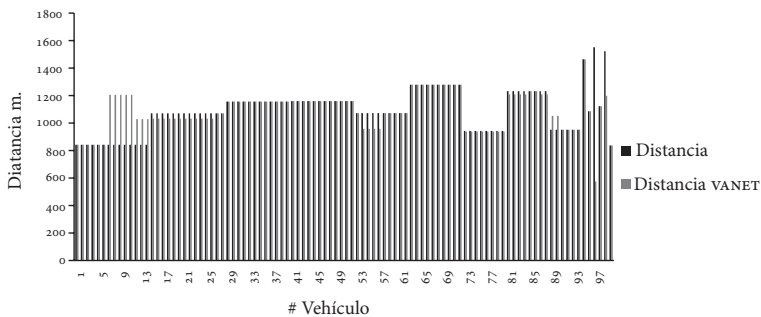
En el caso de los vehículos que utilizan la ruta 4, como se muestra en la figura 18, el primer vehículo marcado con estrella (★) utiliza las aristas programadas al no encontrar ninguna alerta en el momento de ingresar al área de análisis; sin embargo, para los siguientes OBUS se actualiza la red VANET y se ofrece una vía alternativa más corta. Esto da como resultado que los vehículos con id 4.01, 4.02 y 4.03 lleguen a su destino antes que el auto 4.00. A partir del vehículo con id 4.05, la VANET determina que los vehículos pueden tomar las calles programadas, lo que indica que Veins no actúa como un seleccionador de rutas efectivas en tiempo o distancia, sino que su prioridad es resolver problemas de tráfico cuando sea necesario y no imponer un recorrido al usuario.

En la figura 19 se comparan las distancias recorridas para los 100 vehículos tanto para el escenario 1, de solo movilidad, como para el escenario 2, que incluye la VANET. De esta figura se puede deducir que para el escenario 2, un 10 % de los vehículos involucrados presentan un incremento en la distancia recorrida; de este porcentaje, las distancias para los vehículos del 7 al 14 son superiores al utilizar VANET debido a que este grupo de vehículos pertenecen a la ruta 0, cuyo camino programado es una línea recta (la distancia más corta entre dos puntos) y las rutas alternas para evitar tráfico involucran el uso de vías secundarias. Un caso similar se da para los vehículos 89 y 90, que pertenecen a la ruta 8. Al comparar el camino original con la opción que brinda VANET, resulta que la ruta original es la mejor opción en distancia ya que utiliza tan solo dos vías para llegar a su destino, mientras que la alternativa planteada por la VANET cuenta con más de dos vías. El 43 % de los vehículos presenta una disminución en la distancia recorrida; de estos, sobresalen los vehículos 97 y 99 de las rutas 11 y 13, respectivamente, los cuales muestran una reducción

**Figura 18. Variación de la Ruta 4**

a) Ruta 4 programada

b) Solución VANET

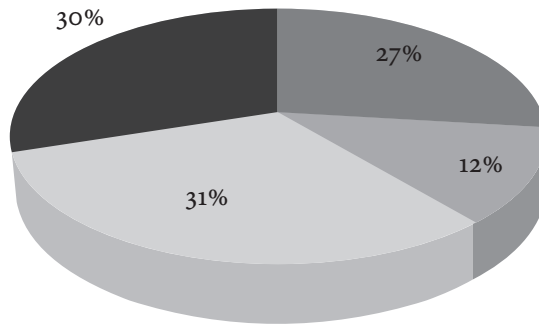
**Figura 19. Comparación de Distancia vs. Distancia VANET**

significativa para llegar a su destino, debido a que dichas rutas son aleatorias. Finalmente, hay que mencionar que el 47 % restante de los vehículos no tienen variación en la distancia recorrida y siguen la ruta programada.

En la figura 20 se muestran los resultados que se generaron al comparar las mediciones realizadas en tiempo y distancia para los dos escenarios. Veins para soluciones de tráfico considera tres parámetros principales como la eficiencia de tráfico, la seguridad de tráfico y el confort del conductor. Se verificó que el 70 % de los vehículos presenta una reducción en tiempo, distancia o ambas, y apenas un 30 % no mostró ninguna mejora o, incluso, presentó un incremento debido a factores como las pocas opciones de rutas alternas que tiene

**Figura 20. Análisis tiempo-distancia de la utilización de la VANET**

- Reducción en tiempo
- Reducción en tiempo y distancia
- Reducción en distancia
- Sin reducción



VANET al emplear un área reducida con varias calles peatonales. Otra razón es la prioridad que se da a la seguridad vehicular, pues obliga a los vehículos a disminuir su velocidad en ciertas intersecciones para prevenir accidentes; y finalmente, la percepción del usuario de movilidad para lo cual ofrece rutas largas en las que no prioriza tiempo ni distancia, sino más bien la necesidad del conductor de moverse.

## CONCLUSIONES

Las VANET permiten la transmisión de mensajes en un conjunto de vehículos a lo largo de las carreteras a fin de informar tanto el estado de estos como el de las carreteras para proporcionar un sistema de transporte inteligente. Para la simulación de una VANET es necesario contar con un simulador de tránsito y otro de red. De las múltiples opciones disponibles, en este trabajo se ha utilizado SUMO como simulador vehicular y OMNET++, con su *framework* Veins, como simulador de red. Se analizó una zona particular del centro histórico de Quito, la cual se encuentra georreferenciada y considera condiciones de tráfico muy cercanas a la realidad, y se aprovechó la información de un proyecto vigente para la geolocalización de las RSU; todo esto con el objetivo de contar con una simulación cuyos resultados sean útiles en una futura implementación. Se verificó que al utilizar la VANET, un 70 % de los vehículos obtuvo una

mejora en tiempo o en distancia. El presente trabajo, además, sirve de guía para la utilización de los simuladores SUMO y OMNET++, y a futuro puede extender su complejidad a un área geográfica mayor e incluir mayores detalles respecto a vehículos, conductores y estados de las vías.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aucancela Palaguachi, D. A. y Espinoza Tenempaguay, E. (2015). «Diseño de una red de comunicación vehicular inteligente, integrando la tecnología *Ad Hoc* con LTE, para la movilidad en la zona urbana de la ciudad de Cuenca», tesis de ingeniería electrónica, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca.
- AUTODESK (2016). AUTOCAD, disponible en <<http://latinoamerica.autodesk.com/products/autocad/overview>> [21 de noviembre de 2016].
- Carrión Mena, F. (2010). «Pico y placa», disponible en <[https://works.bepress.com/fernando\\_carrion/360/](https://works.bepress.com/fernando_carrion/360/)> [23 de agosto de 2016].
- CONQUITO (2016). Mapa | QuitoTeConecta, disponible en <<http://www.quitoteconecta.gob.ec/mapa/>> [22 de noviembre de 2016].
- Diario El Norte*. (2013). «OMM propone en Ecuador urgente reducción emisiones CO<sub>2</sub>», disponible en <<http://www.elnorte.ec/ecuador/30810-omm-propone-en-ecuador-urgente-reduccion-emisiones-co2.html>> [3 de octubre de 2016].
- González Ripoll Cerezo, P. (2012). «Estudio del simulador de redes vehiculares Veins», trabajo final de carrera, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid.
- GOOGLE (2016). Mapa del Centro de Quito, disponible en <<https://www.google.com.ec/maps/@-0.2190291,-78.5108042,16z/data=!5m1!1e1?hl=es-419>> [26 de noviembre de 2016].
- Higashino, T. (2009). “Mobireal: realistic network simulator for MANET”, disponible en <<http://www.mobireal.net/>> [3 de febrero de 2017].
- NetworkSimulationToolsProjectTeam (2017). “GrooveNet Simulator[Network Simulation Tools]”, disponible en <<https://networksimulationtools.com/groove-net-simulator-projects/>> [3 de febrero de 2017].
- OMNET++ (2015). “OMNET++ Discrete Event Simulator-Home”, disponible en <<https://omnetpp.org/>> [26 de agosto de 2016].
- OpenstreetmapFoundation (2016). *OpenStreetMap*, disponible en <<https://www.openstreetmap.org/search?query=Quito#map=17/-0.22027/-78.51296>> [22 de noviembre de 2016].

- Piórkowski, M.; Raya, M.; Lezama Lugo, A.; Papadimitratos, P.; Grossglauser, M. y Hubaux, J. P. (2008). "TraNS: realistic joint traffic and network simulator for VANETS", en *SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 12, núm. 1, pp. 31-33.
- Sommer, C. (2016). Veins (Vehicular in Network Simulation), disponible en <http://veins.car2x.org/download/> [26 de noviembre de 2016]
- \_\_\_\_\_; German, R. y Dressler, F. (2011). "Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis", en *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 10, núm. 1, pp. 3-15.
- SUMO (2016). *Simulation of Urban Mobility*, disponible en <http://www.sumo.dlr.de/userdoc/SUMO-GUI.html> [11 de noviembre de 2016].

# Análisis de métricas de centralidad en diferentes modelos de movilidad vehicular para el plano urbano de la ciudad de Quito

| LUIS F. URQUIZA AGUIAR, CRISTIAN O. RODRÍGUEZ SANTIAGO,  
XAVIER CALDERÓN HINOJOSA\*  
| ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL (EPN), QUITO, ECUADOR

## INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones inalámbricas son susceptibles a ruidos e interferencias debido a que el medio de transmisión no es perfecto y la presencia de obstáculos distorsiona la señal. En una red *ad hoc* vehicular (VANET), la distancia entre vehículos y los edificios son los principales factores para lograr la conectividad entre nodos. Este capítulo analiza la conectividad de una red vehicular en una zona urbana de la ciudad de Quito empleando métricas de centralidad. El estudio de estas métricas puede ser de utilidad para adaptar el comportamiento de los protocolos de comunicaciones. Así también podrían considerarse en el despliegue de infraestructura que facilite las comunicaciones vehiculares, por ejemplo, para mantener la longitud de caminos entre vehículos y puntos de acceso dentro de un intervalo deseado.

Para simular una red vehicular, primero se debe utilizar un modelo de movilidad que emule el comportamiento de los nodos en las vías. Un comportamiento realista de los vehículos en las calles garantiza resultados de simulación confiables. Adicionalmente, se debe considerar que la cantidad de vehículos

\* Los autores agradecen el financiamiento otorgado por la Escuela Politécnica Nacional para la realización del proyecto PIJ-15-20-«E-iRoads: Ecuador-Intelligent Roads. Un Sistema inteligente para la gestión de tráfico en las periferias de grandes ciudades (Caso de Estudio: Quito)». Este trabajo está parcialmente financiado por el gobierno de España a través del proyecto TEC2014-54335-C4-1-R INcident monitoRing In Smart COmmunities, QoS and Privacy (INRISCO).

Correos electrónicos de los autores: luis.urquiza@epn.edu.ec, cristian.rodriguez02@epn.edu.ec, xavier.calderon@epn.edu.ec

varía en una ciudad dependiendo de la hora del día, por lo cual es importante analizar qué sucede cuando la densidad de vehículos cambia. Es por ello que en este capítulo se analizan los cambios en las métricas de centralidad de la red vehicular en función de la densidad de nodos, la presencia/ausencia de los obstáculos y el uso de dos modelos de movilidad ampliamente utilizados en la literatura.

## MODELADO DEL COMPORTAMIENTO DEL CONDUCTOR

De acuerdo con la clasificación propuesta por Fiore *et al.* (2007), los modelos de movilidad pueden clasificarse en cinco grupos: basados en flujo de tráfico, basados en colas, estocásticos, de seguimiento de vehículos y los basados en comportamiento. Los modelos de flujo consideran la movilidad vehicular como un fenómeno hidrodinámico, es decir, que el modelo hace una analogía del tráfico como si fuese un flujo de un fluido, en el cual no se distinguen los vehículos que integran un determinado flujo y, por tanto, no se consideran características con las que se mueve cada vehículo de forma particular. Por el contrario, este tipo de modelos pueden representar un camino como un enlace que tiene cierta capacidad de flujo. Por su parte, en el modelo basado en colas, las calles son modeladas como servidores FIFO (*First-In First-Out*) y los vehículos como clientes de estos sistemas. Respecto a los modelos estocásticos, estos incluyen aleatoriedad en las decisiones de movimiento de los vehículos, mientras que en los modelos de seguimiento de vehículos, la conducta de cada uno depende del coche de en frente. Finalmente, en los modelos basados en comportamiento, cada movimiento es determinado por reglas como las generadas por influencias sociales. A continuación, se explican más detalladamente cada uno de los mismos.

### Modelos de Flujo de Tráfico

Uno de los modelos de este tipo más usados es el modelo de tráfico de fluido, *Fluid Traffic Model* (FTM) (Seskar *et al.*, 1992), el cual toma en cuenta la presencia de vehículos cercanos para el cálculo de la velocidad. Este modelo no considera la interacción de múltiples flujos. FTM describe la velocidad como una función decreciente monolítica de la densidad vehicular, forzándola ha-

cia un límite bajo cuando la congestión alcanza niveles críticos, empleando la ecuación 1.

$$s = \left[ s_{min}, s_{max} \left( 1 - \frac{k}{k_{jam}} \right) \right] \quad (1)$$

donde la velocidad es  $s$ , y  $s_{min}$  y  $s_{max}$  son la velocidad mínima y máxima respectivamente,  $k_{jam}$  es la densidad vehicular para una condición de congestión vehicular y  $k$  es la densidad vehicular actual. La densidad se calcula como  $k = n/l$ , donde  $n$  es el número de vehículos en la calle y  $l$  es la longitud del segmento de calle (entre dos nodos).

El FTM describe escenarios de congestión, pero no puede considerar encolado ni un correcto comportamiento del vehículo en intersecciones. Además, no considera aceleración, por lo que un vehículo con alta velocidad puede entrar en una calle corta y congestionada, cambiando repentinamente su velocidad a un valor muy bajo.

## Modelo de Colas

Como se mencionó anteriormente, en este modelo las calles son consideradas servidores con colas FIFO y los vehículos como clientes. Cada cola (calle)  $k$  se caracteriza por su longitud  $l^k$  y un máximo flujo  $q_{max}^k$  limitado por el número de carriles. Un vehículo entra a la cola, y un tiempo de viaje se calcula a partir de una velocidad  $v_{max}$  máxima deseable, el número de vehículos en la cola  $n^k$  y la longitud de la cola.

Si el tiempo de viaje expira, el vehículo se retira de la cola y se inserta en la siguiente. Cuando existen varias opciones al salir de una cola, es necesario un paso intermedio; se pone una cola por cada opción a la salida y los vehículos se ubican en la cola que los lleva a su destino.

Si se alcanza la capacidad de una calle, es decir si tiene  $c^k$  vehículos encolados, entonces los vehículos tendrán que esperar hasta que un espacio esté disponible en la cola. Este tipo de modelo también es conocido como mesoscópico, ya que describe el movimiento de cada vehículo de manera independiente, pero con un mínimo nivel de detalle. La implementación es computacionalmente barata porque el estado de un vehículo solo se actualiza cuando existen cambios en la cola, característica aprovechada para simular extensas topologías con miles de vehículos.

## Modelos Estocásticos

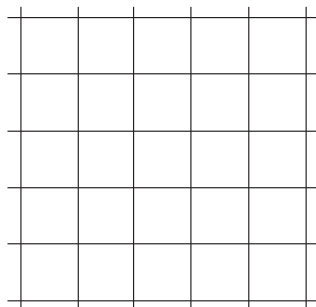
En los modelos estocásticos, las decisiones de movimiento son tomadas de forma aleatoria. El modelo de movilidad estocástico más sencillo para una ciudad es el llamado esquema en parrilla o Manhattan (Camp, Boleng y Davies, 2002), como se muestra en la figura 1. Este modelo emplea un enfoque probabilístico, en el cual un vehículo escoge seguir en la misma dirección con un 50 % de probabilidad, o gira a la derecha o izquierda con un 25 % de probabilidad, respectivamente. En este modelo los vehículos se mueven por las calles con velocidad constante durante toda la simulación. Por tanto, el modelo Manhattan no representa un comportamiento realista de movilidad porque las reglas que emplea para la generación de los movimientos son muy simples.

## Modelos de Seguimiento de Vehículos

Los modelos de seguimiento de vehículos hacen que el comportamiento de un coche dependa de la conducta del líder (precedente). La idea detrás de este criterio es que los conductores eviten colisiones, por tanto, adaptan su comportamiento a su entorno. Estos modelos son categorizados como microscópicos, ya que modelan el comportamiento de cada vehículo. Dos modelos de esta categoría son brevemente analizados en esta sección: el Krauss y el del conductor inteligente (IDM, *Intelligent Driver Model*).

El modelo de Krauss (Krauss, Wagner y Gawron, 1997) tiene cuatro parámetros: la velocidad máxima  $v_{max}$ , la aceleración máxima  $a$ , la desaceleración máxima  $b$ , y un ruido  $\sigma$  que introduce un comportamiento estocástico al mo-

**Figura 1. Topología utilizada en el modelo de Manhattan**



delo.  $\sigma$  representa la imprecisión del conductor para alcanzar la velocidad deseada. El tiempo es discreto en pasos de  $\Delta t$ .

$$v_i^{safe}(t + \Delta t) = v_{i+1}(t) + \frac{\Delta r_i(t) - v_{i+1}(t)\tau}{\frac{(v_i(t) + v_{i+1}(t))}{2b} + \tau} \quad (2)$$

donde la ecuación 2 calcula la velocidad  $v_i^{safe}$  de un vehículo  $i$  manteniendo una distancia segura  $v_{i+1}(t)\tau$  del vehículo líder  $i + 1$ , la distancia actual entre los dos vehículos, el tiempo de frenado desde la velocidad media de los dos vehículos es  $\frac{(v_i(t) + v_{i+1}(t))}{2b}$  y el tiempo de reacción del conductor se representa por  $\tau$ . La velocidad deseada  $v_i^{desired}$  por el vehículo  $i$  para el tiempo  $(t + \Delta t)$  se determina con la ecuación 3, como el mínimo de: velocidad máxima, la velocidad actual más el incremento por una aceleración uniforme y la velocidad segura.

$$v_i^{desired}(t + \Delta t) = \min[v_{max}, v_i(t) + a\Delta t, v_i^{safe}(t + \Delta t)] \quad (3)$$

Finalmente, la ecuación 4 determina la velocidad definitiva del vehículo seguidor añadiendo aleatoriedad a través de la variable aleatoria uniforme  $\sigma$  en el porcentaje  $\epsilon$  de la máxima velocidad alcanzable  $a \Delta t$ . Nótese que la velocidad no puede ser negativa.

$$v_i(t + \Delta t) = \max[0, v_i^{desired}(t + \Delta t) - \epsilon a \Delta t \sigma] \quad (4)$$

Otro modelo basado en el seguimiento de vehículos líder es el modelo de conductor inteligente, IDM (Krauss, Wagner y Gawron, 1997). Para IDM, la aceleración instantánea se calcula de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dv}{dt} = a \left[ 1 - \frac{v^4}{v_0} - \frac{s^*}{s} \right] \quad (5)$$

$$s^* = s_0 + vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \quad (6)$$

En la ecuación 5,  $v$  es la velocidad actual del vehículo,  $v_0$  es la velocidad deseada,  $s$  es la distancia medida desde el vehículo anterior y  $s^*$  es la distancia dinámica deseada.  $s^*$  se calcula con la ecuación 6 y depende de la distancia mínima entre vehículos  $s_0$ , el tiempo mínimo de seguridad  $T$ , la diferencia de

velocidad con respecto al vehículo de enfrente  $\Delta v$ , la aceleración máxima  $a$  y máxima desaceleración  $b$ .

El modelo IDM puede emular las interacciones entre vehículos en un solo carril. Es posible reproducir escenarios de encolado tras un vehículo lento o reducción de velocidad bajo condiciones de congestión.

Se han propuesto dos extensiones del modelo para completar IDM, ya que por sí solo no obtiene una movilidad realista para ambientes urbanos. IDM-IM (IDM con Gestión de Intersección) añade capacidades de interacción en las intersecciones; IDM-LC (IDM con Cambio de Carril) extiende IDM-IM para que los vehículos puedan cambiarse de carril y rebasarse unos a otros.

## Modelos Basados en Comportamiento

Cada movimiento se determina por sus reglas de comportamiento. Las reglas pueden ser modeladas como fuerzas de atracción o repulsión; una intersección es una fuerza de atracción, mientras que otros vehículos y obstáculos constituyen fuerzas de repulsión. El resultado de la composición de las fuerzas resulta en el vector de aceleración del vehículo (destacar que la aceleración es el resultado de las fuerzas).

## MÉTRICAS DE CENTRALIDAD EN GRAFOS

Un grafo  $G = (V, E)$  es un objeto abstracto formado por un conjunto de  $V$  nodos o vértices y un conjunto de  $E$  enlaces que unen pares de nodos. La cardinalidad de cada conjunto se denota como  $n$  para los nodos y  $m$  para los enlaces.

Se distinguen dos tipos de grafos: dirigidos y no dirigidos. Un enlace en un grafo no dirigido une los vértices  $u, v \in V$  y se denota como  $\{u, v\}$  y representa una conexión bidireccional entre los dos nodos  $u, v$ . En grafos dirigidos, cada enlace tiene un origen  $u \in V$  y un destino  $v \in V$  y se representa como un par ordenado  $(u, v)$  y solo representa una conexión unidireccional desde  $u$  hacia  $v$ . En ambos casos se pueden denotar los enlaces como  $uv$ .

Un grafo ponderado (*weighted graphs*) consiste en añadir valores numéricos (pesos) a los enlaces o nodos. El peso de un enlace puede ser representado como una función  $w : E \rightarrow \mathbb{R}$  que asigna a cada enlace  $e \in E$  un peso  $w(e)$ . Dependiendo del contexto, el peso puede interpretarse como costo, capacidad o fuerza de interacción, entre otros (Brandes, 2005).

A continuación, se describen las métricas de centralidad más empleadas en análisis de redes. Las métricas de centralidad de un nodo son herramientas matemáticas utilizadas para el análisis de las propiedades estructurales de una red. El objetivo es identificar a los nodos más importantes.

## Componentes

Un componente  $S$  es un subconjunto de nodos de un grafo  $G$ , en el cual existe al menos un camino entre cada par de nodos  $a, b \in S$ , pero no existe ningún camino entre un nodo  $a \in S$  y  $c \notin S$ . De esta definición es claro que la unión de todos los componentes es igual al conjunto de nodos y la intersección de dos componentes es vacía.

Un componente se considera fuertemente conectado si para cada par de nodos  $a, b \in S$ , existe un camino desde  $a$  hacia  $b$  y desde  $b$  hacia  $a$ , y débilmente conectado si solo existe uno de estos dos caminos. En grafos bidireccionales, la conectividad fuerte y la débil coinciden.

## Longitud media de las rutas más cortas y diámetro de la red

Se entiende por ruta más corta a la que une dos nodos  $a, b \in S$  con el menor número de saltos por nodos intermedios. Se debe destacar que se consideran costes unitarios de los enlaces para este cálculo.

Para el cómputo de la longitud media de las rutas más cortas y diámetro de la red, se obtienen las rutas más cortas para todos los pares de nodos  $a, b \in S$ , si y solo si existe una ruta entre  $a$  y  $b$ , esto es, si  $a, b \in V_i$ , donde  $S_i$  es un componente de la red. La longitud media de estas rutas indica el número de saltos promedio que un paquete debe efectuar para alcanzar un destino dentro de su componente  $S_i$  que forma parte en la red. A su vez, el diámetro de una red se define como el máximo de las distancias más cortas.

## Grado

Se conoce como grado de un nodo  $v$  al número de enlaces conectados al mismo. En un grafo no dirigido  $G = (V, E)$ , la función grado se denota como  $d(v)$ , mientras que en un grafo dirigido cada nodo tiene un grado de salida  $d^+(v)$  y

un grado de entrada  $d^-(v)$ . El grado de entrada es el número de enlaces que tienen a  $v$  como destino, y el grado de salida consiste en la cantidad de enlaces cuyo origen es  $v$ . Para el caso de nodos con enlaces que tienen asociada una función de peso  $w$ , se calcula el grado ponderado del nodo  $v$  como la suma de los pesos de los enlaces conectados al mismo, es decir:

$$d_w(v) = \sum_{e \in E_v} w(e) \quad (7)$$

donde  $E_v$  son los enlaces conectados a  $v$  en grafos no dirigidos. Para grafos dirigidos, el cálculo de  $d_w^+(v)$  y  $d_w^-(v)$  se realiza con  $E_v^+$  y  $E_v^-$ , respectivamente. El grado promedio de un grafo se calcula utilizando la ecuación 8 y el grado promedio ponderado de acuerdo con la ecuación 9, donde  $|V|$  es cardinalidad del conjunto de nodos  $V$  (Brandes, 2005).

$$\bar{d}(G) = \frac{1}{|V|} \sum_{v \in V} d(v) \quad (8)$$

$$\bar{d}_w(G) = \sum_{v \in V} d_w(v) \quad (9)$$

## Cercanía

El cálculo de la métrica de cercanía (*closeness centrality*) da una idea de lo conectado que está un nodo dentro del componente  $S$  al que pertenece en el grafo. La fórmula utilizada para el cálculo se expresa en la ecuación 10.

$$Cc(x_i) = \frac{|S| - 1}{\sum_{j \neq i} dist(x_i, x_j)} \quad (10)$$

El valor de  $dist(x_i, x_j)$  es la menor distancia (en número de saltos) entre los nodos  $x_i$  y  $x_j$ . Se debe destacar que en el cálculo de la métrica de cercanía no interviene el peso de los enlaces. Un ejemplo de la utilidad de esta métrica está en el análisis de redes sociales donde un individuo con una alta cercanía puede difundir ideas más rápido (Vázquez-Rodas y de la Cruz Llopis, 2015). En el caso de estudio de este capítulo, la cercanía identifica a los nodos que son capaces de propagar un mensaje en el menor número de saltos al resto de nodos del componente.

## Intermediación

La intermediación (*betweenness centrality*) se define matemáticamente en la ecuación 11.

$$C_B(v) = \sum_{s \neq v \neq t \in V} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}} \quad (11)$$

donde  $\sigma_{st}$  representa el número de rutas más cortas entre  $s$  y  $t$ , y el número de esas rutas que pasan por el nodo  $v$  es  $\sigma_{st}(v)$  (Brandes, 2005).

## METODOLOGÍA

Como se mencionó en la introducción, el objetivo de esta investigación es el análisis de conectividad de la red entre vehículos, basado en métricas de centralidad sobre trazas sintéticas de movimientos de vehículos en la ciudad de Quito, generadas con dos modelos de movilidad diferentes, Krauss e IDM. Adicionalmente, se compara la conectividad considerando una topología real con obstáculos y una ideal, en la que no existe otra atenuación de la señal más que la distancia entre nodos.

### Descripción de las simulaciones

El área de simulación del movimiento vehicular es el sector de la Carolina, zona de Quito normalmente congestionada en horas pico. La topología de calles e intersecciones se puede ver en la figura 2. La traza de movimiento de los vehículos se obtuvo con el *software CityMob for Roadmaps* (C4R) (Fogue *et al.*, 2012), el cual utiliza *Simulation of Urban MObility* (SUMO) (Krajzewicz *et al.*, 2012) para proveer de realismo al movimiento de los vehículos durante el recorrido de la ruta. El área de simulación se importa a C4R desde la plataforma *OpenStreetMap* (OpenStreetMap, 2017). La traza sintética de movimientos vehiculares generada por C4R se almacena en un archivo *.tcl*, compatible con el simulador *NS-2*. Los archivos *.tcl* tienen información de la posición de cada vehículo en cada instante, típicamente en pasos de un segundo.

C4R define orígenes y destinos aleatorios dentro del área de simulación para cada vehículo dentro de la misma. Además, C4R establece la ruta que el

Figura 2. Escenario de simulación



vehículo debe seguir entre estos dos puntos durante el tiempo de simulación. La ruta calculada por C4R para cada vehículo es el camino más corto entre estas dos posiciones, tal como un GPS lo hace.

En este capítulo se analiza la conectividad entre vehículos en cinco diferentes cantidades de vehículos en el área de simulación. Estas son: 100, 125, 150, 175 y 200 que corresponden a densidades de 25, 31, 37, 43, y  $49 \frac{veh}{km^2}$ , respectivamente. Se realizan 25 simulaciones por cada densidad, cada una de ellas con una duración de 40 segundos. Para el análisis de conectividad se usaron ocho topologías formadas a lo largo de cada una de las simulaciones, una cada cinco segundos. Los parámetros del escenario descrito se resumen en la tabla 1.

### Configuración de modelos de movilidad

En este capítulo se utilizan dos modelos de movilidad: IDM (Kesting, Treiber y Helbing, 2008) y Krauss (Krauss, Wagner y Gawron, 1997). En el *software* C4R, el modelo de movilidad Krauss toma como parámetros de entrada: la aceleración, la desaceleración,  $\sigma$ , y  $\tau$ .  $\sigma$  representa la imperfección del conductor y su valor usual es 0.5 de acuerdo con Krajzewicz (2010).  $\tau$  es el tiempo de reacción del conductor, esto es, el tiempo que tarda en recorrerse la distancia de separación entre vehículos. En este capítulo se usa  $\tau = 3s$ , que es la recomendación para una frenada de emergencia (Distancia de seguridad entre vehículos, n.d.).

TABLA I. Parámetros de configuración del escenario de simulación

Característica	Valor
Zona	Quito, sector La Carolina
Área	2,55 km x 1,6 km
Número de intersecciones	929 (227 × km <sup>2</sup> )
Número de calles	1325 (324 × km <sup>2</sup> )
Número de edificaciones	4100 (1004 × km <sup>2</sup> )
Número de vehículos	100, 125, 150, 175 y 200
Modelos de movilidad	IDM (Kesting, Treiber y Helbing, 2008), Krauss (Krauss, Wagner y Gawron, 1997)
Generador de movilidad	SUMO (Krajzewicz <i>et al.</i> , 2012) / C4R (Fogue <i>et al.</i> , 2012)
Número de simulaciones	25 por cada densidad de vehículos
Duración de simulación	40 segundos

Los parámetros de configuración del modelo IDM en el *software* C4R son: la aceleración, la desaceleración, el *HeadWay* y el *MinGap*. El *HeadWay* es  $T$  en la descripción de ecuaciones de IDM, mientras que *MinGap* es la distancia  $s_0$  en metros con el vehículo de enfrente. Los valores recomendados para estos dos parámetros de acuerdo con Treiber y Kesting (2010) son 1,5 s para *HeadWay* y 2 m para *MinGap*.

Para estimar los valores de aceleración y desaceleración con los que se configurarán los modelos de movilidad anteriormente mencionados, se emplea información de los principales modelos de vehículos utilizados en la ciudad de Quito. Los datos obtenidos de los fabricantes, que se incluyen en la tabla II, fueron los siguientes: el cilindraje del motor medido en centímetros cúbicos, el tiempo en alcanzar 100 km/h desde 0 km/h, y la distancia de frenado de 100 km/h a 0 km/h. A partir de estos datos, es posible calcular la aceleración máxima y la desaceleración máxima. Estos valores representan una referencia para determinar un valor adecuado de aceleración y desaceleración de los vehículos.

Considerando los valores de la tabla II, en las simulaciones se utilizan valores de aceleración y desaceleración que corresponden a un 60 % y 30%, respectivamente, de la aceleración y desaceleración máximas de los vehículos con menores prestaciones incluidos en la mencionada tabla. Los parámetros de configuración de los modelos de movilidad en el *software* C4R para la ciudad de Quito se resumen en la tabla III.

TABLA II. Datos de aceleración y desaceleración

Vehículo	Cilindraje motor [cc]	t [s] o a 100 m/h	d [m] 100 a 0 km/h	Aceleración máxima	Desaceleración máxima
Chevrolet Aveo 2011	1600	12	42.8	2.31	-9.01
Nissan Versa 2017	1600	11.4	43.6	2.44	-8.85
Kia Rio 2017	1600	10.3	44.8	2.70	-8.61
Toyota Corolla 2017	1800	10.5	44.6	2.65	-8.65
Hyundai Elantra 2016	1800	10.6	44.6	2.62	-8.65
Mazda 3 2017	2000	9.6	42.9	2.89	-8.99
Honda Civic 2015	1800	9.9	45	2.81	-8.57

TABLA III. Parámetros de modelos Krauss e IDM para la ciudad de Quito

Parámetro	Krauss	IDM
Aceleración	1.5 m/s <sup>2</sup>	1.5 m/s <sup>2</sup>
Desaceleración	3 m/s <sup>2</sup>	3 m/s <sup>2</sup>
Sigma	0.5	-
Tau / HeadWay	3 s	1.5 s
MinGap	-	2 m

TABLA IV. Parámetros de conectividad de las simulaciones.

Característica	Valor
Modelo de Path loss	Modelo empírico de radio <i>shadowing</i> IEEE 802.11p (Sommer <i>et al.</i> , 2011). $\alpha = \frac{9db}{pared} \beta = \frac{0.4db}{m}$
Sensibilidad de antena	-80 dBm.
Potencia de transmisión	8 dBm (~70 m).
Tasa del enlace	9 Mbps.

Para los escenarios en los que se considera la presencia de edificios, es necesario extraer esta información desde el mapa descargado de *OpenStreetMaps* con el *software polyconvert* (Krajzewicz, 2010), provisto en el grupo de herramientas de SUMO.

Para determinar si dos nodos tienen conectividad en un instante dado, se usan la potencia de recepción, la sensibilidad de la antena y la atenuación por presencia de edificios (si se la considera). Esta tarea se realiza mediante un *software* desarrollado por parte de Urquiza (n.d.). Dicho *software* toma como parámetros de entrada el archivo de trazas vehiculares .tcl y el archivo con extensión .poly.xml que contiene la información de los obstáculos. La mitad de las simulaciones consideran la presencia de los edificios y la otra mitad no la considera. Esto se realiza para comparar las estadísticas de centralidad entre las simulaciones que consideran y no consideran la presencia de edificios.

Para los cálculos de las métricas de centralidad, se considera que existe un enlace activo entre los nodos  $a$  y  $b$  si en, al menos, una de las ocho topologías muestreadas a lo largo de la simulación, existió conectividad entre estos dos nodos.

Un ejemplo de la conectividad de una red vehicular considerando la presencia y ausencia de edificios se muestra en las figuras 3 y 4, respectivamente. Ambas figuras representan la posición centroide de los vehículos a lo largo de la simulación, así como sus enlaces para una densidad de 100 vehículos con el modelo IDM. El cálculo de estadísticas de centralidad se realizó con un *software* dedicado a la representación de grafos denominado Gephi, disponible en Gephi (n.d.).

Es indiscutible la gran diferencia entre la figura 3 y figura 4. La presencia de obstáculos disminuye significativamente la conectividad entre los nodos. La figura 3 muestra claramente una topología con menor número de enlaces con respecto al número de enlaces de la figura 4. Un análisis de los resultados de las métricas de centralidad en los diferentes escenarios se detalla en la siguiente sección.

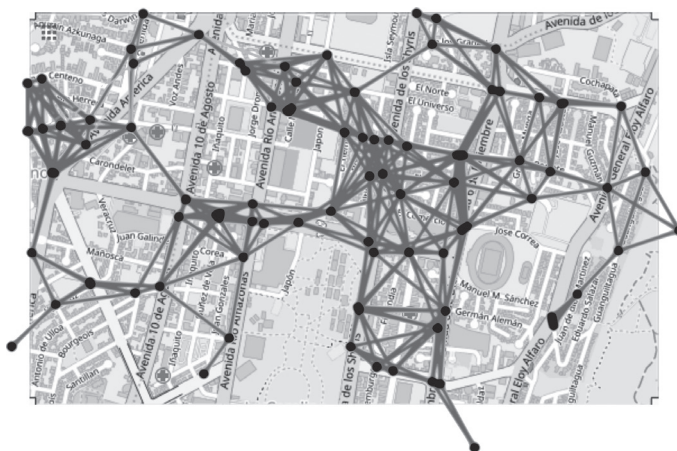
## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados que se detallan a continuación corresponden a las métricas de centralidad en función de la densidad de vehículos considerando la presencia y ausencia de edificios, así como el modelo de movilidad empleado. En la leyenda de las gráficas, el término «obs» corresponde a resultados considerando

**Figura 3. Conectividad de los nodos considerando obstáculos**

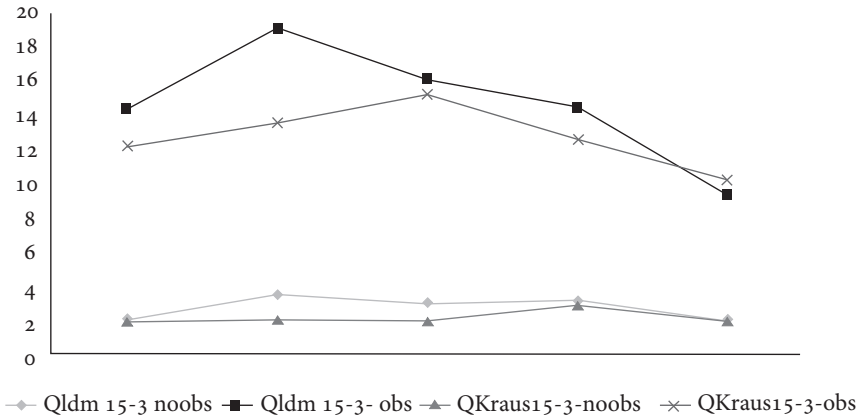


**Figura 4. Conectividad de los nodos sin considerar obstáculos**



la presencia de edificios y el término «noobs» está asociado a la ausencia de edificios. Las métricas de centralidad analizadas fueron grado, cercanía, intermediación, densidad y diámetro de la red.

El número de componentes de la red vehicular en función de la densidad de vehículos para nuestro escenario se muestra en la figura 5. Como se puede observar, el número de componentes varía muy poco (entre dos y cuatro componentes) en el caso que no se considera presencia de obstáculos para los

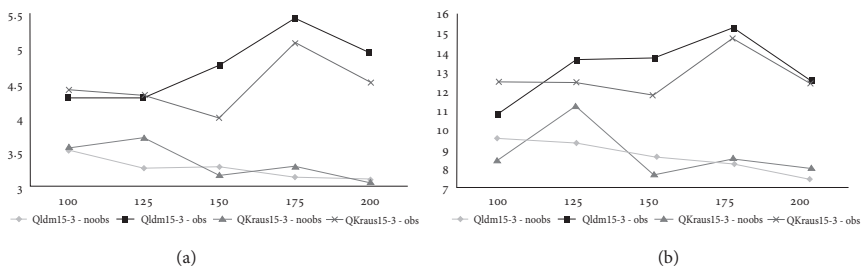
**Figura 5. Promedio de número de componentes vs. número de vehículos**

diferentes valores de densidad vehicular. Esto quiere decir que la red no ve afectada su conectividad de forma significativa si no se considera la presencia de obstáculos. Por otro lado, considerando un escenario realista, con presencia de obstáculos, el número de componentes en la red sube considerablemente. Esto significa que la red se vuelve mucho más desconectada y, en consecuencia, forma más grupos aislados de nodos.

Adicionalmente, en presencia de obstáculos, el aumento del número de vehículos en el área hace que la red se vuelva más conectada y, en consecuencia, el número de componentes descienda (se puede notar desde 125 y 150 nodos para los modelos IDM y Krauss, respectivamente, en la figura 5). El hecho que el número de componentes sea menor en la densidad de 100 nodos con respecto a la de 125 nodos, puede deberse a la forma en la que C4R dispone aleatoriamente los vehículos.

Las figuras 6a y 6b muestran el promedio de las rutas más cortas y el diámetro de la red en función del número de vehículos. Para el caso en el que únicamente se considera la distancia entre nodos para el análisis de conectividad, se puede observar que el promedio de rutas más cortas fluctúa levemente entre las diferentes densidades de vehículos, con tendencia a disminuir a medida que la cantidad de vehículos aumenta y existe mayor conectividad. El mismo comportamiento se puede ver en el diámetro de la red. Respecto a los resultados que consideraron la presencia de obstáculos, se observa un incremento en el promedio de las rutas más cortas y el diámetro de la red en función del número de nodos (ver incremento en figura 6a y figura 6b desde 100 a 175 nodos).

**Figura 6. a) Promedio de las rutas más cortas vs. número de vehículos**  
**y b) Promedio de los diámetros de la red vs. número de vehículos**



La razón para esto es que la red mejora su conectividad y, por lo tanto, existe menor cantidad de componentes (ver figura 5). Se debe destacar que existe un descenso en el promedio de ambas métricas (rutas más cortas y diámetro), dado que es la densidad vehicular con mejor conectividad lo que facilita la creación de mejores rutas.

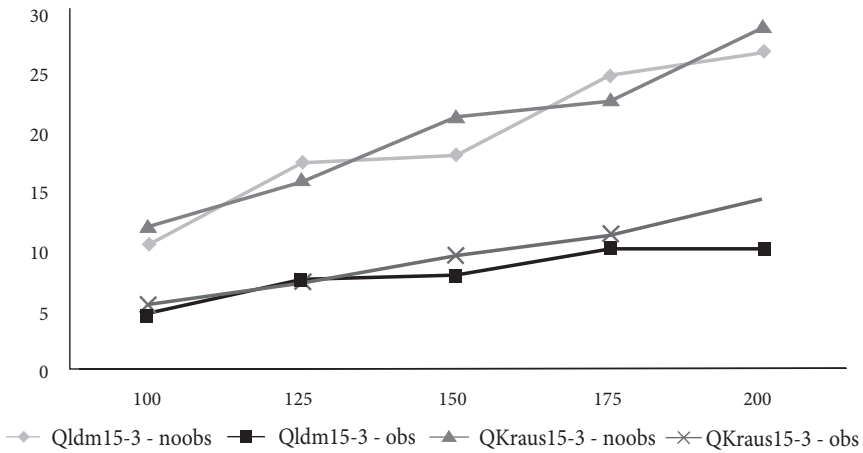
La figura 7 muestra el promedio del grado de los nodos en función de la densidad de vehículos para cada modelo de movilidad.

Como se observa, el promedio del grado crece linealmente a medida que la densidad de vehículos aumenta, puesto que en promedio hay más vehículos en cada calle. Así también, el grado es mayor cuando no se consideran obstáculos, debido a que no existe la atenuación adicional de edificios, lo que provoca que haya más vehículos que puedan verse entre sí. Adicionalmente, en la figura 7 se destaca que el modelo de movilidad empleado no afecta significativamente al promedio del grado de los nodos.

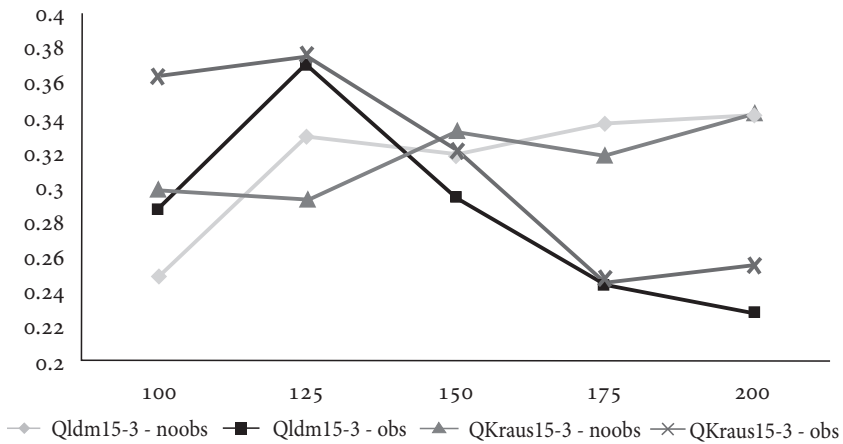
El promedio de la cercanía en función de la densidad de nodos se muestra en la figura 8. Como el lector recuerda, la cercanía consiste en el promedio del valor recíproco de las distancias más cortas desde un nodo a todos los demás nodos en su componente. El promedio de esta métrica solo se puede interpretar de manera acertada en los escenarios en los que no se consideran obstáculos. La razón de esto es que el número de componentes de la red no varía drásticamente. Esto implica que las longitudes de las rutas de los mismos tienden a disminuir a medida que el número de nodos aumenta (ver figura 6a y figura 6b). Por lo tanto, en una topología sin obstáculos un nodo puede propagar la información más rápido (menor número de saltos) con mayor densidad de vehículos, ya que tiene un valor más alto de cercanía.

En una topología con obstáculos, el promedio de cercanía no debe ser tomado como un valor confiable debido a que la cantidad de componentes es

**Figura 7. Promedio del grado de los nodos vs. número de vehículos**

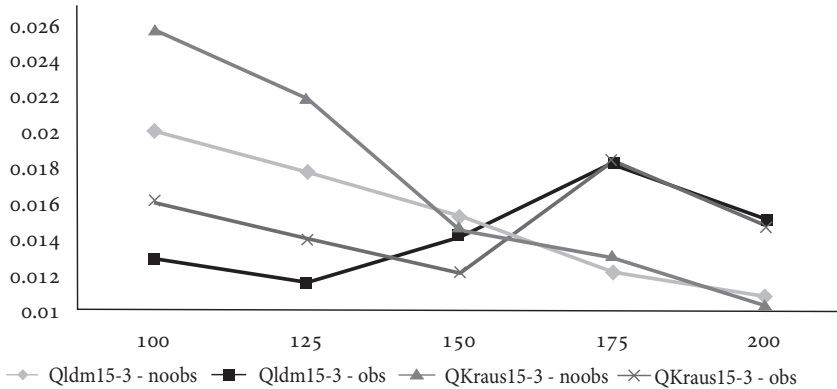


**Fig. 8. Promedio de cercanía vs. número de vehículos**



elevada y el número de nodos por componente es pequeño. Eso resulta en valores de cercanía más altos que los que se obtendrían en componentes más grandes (con mayor cantidad de nodos) y que dan lugar a una red más conexas y con rutas más largas.

Una explicación detallada se necesita para los valores de cercanía obtenidos en las densidades de 100 y 125 nodos con obstáculos. En estas dos densidades

**Figura 9. Promedio de intermediación vs. número de vehículos**

de vehículos existe un mayor número de componentes pequeños (seis u ocho nodos por componente en promedio, ver alto número de componentes de figura 5), en los cuales las distancias son más cortas entre cada par de nodos de estos componentes que en componentes más grandes (ver resultados de figura 8).

Respecto a los valores de cercanía para densidades vehiculares más altas, considerando la presencia de edificios, se puede observar que el valor tiende a disminuir. La razón para ello es que el número de componentes de la red decrece cuando la densidad de vehículos aumenta. Si el número de componentes es menor, la distancia entre un par de nodos dentro de cada componente será en promedio mayor que en componentes pequeños. También se puede apreciar que no existen diferencias importantes entre los dos modelos para cálculo de esta métrica.

En la figura 9 se muestra el promedio de la intermediación en función del número de vehículos. La intermediación mide cuántas veces un nodo actúa como puente entre los caminos más cortos de otros dos nodos. Para el caso de una topología sin obstáculos, hay menos nodos puente a medida que la densidad de vehículos aumenta, debido a que se forman más enlaces directos y rutas más cortas entre cada par de nodos.

Respecto a los resultados de una topología con obstáculos, la intermediación promedio de un nodo es menor para una baja densidad de vehículos, debido a que predominan comunicaciones directas y rutas cortas (ver figura 6a). Para densidades de vehículos entre 125 y 175, la intermediación promedio de

los nodos aumenta, ya que es posible la conectividad entre un par de nodos distantes, pero no la formación de múltiples rutas alternas. Cuando la densidad de vehículos es igual a 200, la intermediación promedio de los nodos disminuye debido a que, en general, existe más de una ruta más corta entre cada par de nodos. El modelo de movilidad repercute solo cuando la densidad de vehículos es baja (diferencias de 15 % aproximadamente), y tiende a ser indiferente a medida que el número de vehículos aumenta.

## CONCLUSIONES

En este capítulo se analizó el impacto que tienen los modelos de movilidad y la presencia de edificios en la conectividad de una red vehicular en un área de la ciudad de Quito, en Ecuador. La estructura de la red fue analizada con las métricas de centralidad de grado, cercanía e intermediación, entre otras.

Los resultados indican que cuando el número de nodos va en aumento en el escenario realista, la red vehicular está formada por una menor cantidad de componentes, volviéndose más conexas. Además, se aprecia que los nodos aumentan su grado promedio, se crean rutas más largas, pero generalmente no redundantes, lo que resulta en cercanías bajas e intermediaciones altas.

La comparación de las métricas de centralidad entre el escenario ideal y el realista (con obstáculos) deja ver que una idea fiable de la conectividad en el escenario realista solo es posible si se analizan todas las métricas en conjunto. El análisis de una de estas métricas de forma aislada puede llevar a una mala interpretación del estado de la conectividad debido a la presencia de componentes en la red, la cual afecta al cómputo de las métricas.

En trabajos futuros se incluye la variación de los parámetros de los modelos de movilidad para observar su impacto en las métricas de centralidad para una densidad de nodos fija. También es de interés modificar las métricas de centralidad para incluir el tiempo de duración del enlace en el cómputo de las mismas.

## REFERENCIAS

Brandes, U. (2005). "Network analysis: methodological foundations", vol. 3418. Springer Science & Business Media.

- Camp, T.; Boleng, J. y Davies, V. (2002). "A survey of mobility models for ad hoc network research", en *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2, núm. 5, pp. 483-502.
- Distancia de seguridad entre vehículos (n.d.). Disponible en <https://www.seguridad-vial.net/conduccion/reglas-circulacion/66-distancia-de-seguridad> [20 de enero de 2017].
- Fiore, M.; Harri, J.; Filali, F. y Bonnet, C. (2007). "Vehicular mobility simulation for VANETS", en *Proceedings of the 40th Annual Simulation Symposium (ANSS)*, Norfolk, VA, USA, pp. 301-309.
- Fogue, M.; Garrido, P.; Martínez, F. J.; Cano, J. C.; Calafate, C. T. y Manzoni, P. (2012). "A realistic simulation framework for vehicular networks", en *Proceedings of the 5th International Conference on Simulation Tools and Techniques (ICST)*, Bruselas, Bélgica, pp. 37-46.
- Gephi (n.d.). The Open Graph Viz Platform. Disponible en <https://gephi.org/> [10 de febrero de 2017].
- Kesting, A.; Treiber, M. y Helbing, D. (2008). "Agents for traffic simulation", arXiv Preprint arXiv:0805.0300.
- Krajzewicz, D. (2010). "Traffic Simulation with SUMO-Simulation of Urban Mobility", en Barceló, J. (ed.). *Fundamentals of Traffic Simulation. International Series in Operations Research & Management Science*, vol 145. Springer, New York, pp. 269-293.
- \_\_\_\_\_, Erdmann, J.; Behrisch, M. y Bieker, L. (2012). "Recent development and applications of SUMO-Simulation of Urban Mobility", en *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, vol. 5, (3 y 4), pp. 128-138.
- Krauss, S.; Wagner, P. y Gawron, C. (1997). "Metastable states in a microscopic model of traffic flow", en *Physical Review E*, vol. 55, núm. 5, pp. 5597-5602.
- OpenStreetMap* (2017). OpenStreetMap. Disponible en <http://www.openstreetmap.org> [20 de enero de 2017].
- Seskar, I.; Maric, S. V.; Holtzman, J. y Wasserman, J. (1992). "Rate of location area updates in cellular systems", en *Proceedings of the IEEE 42nd Vehicular Technology Conference*, Denver, CO, USA, pp. 694-697.
- Sommer, C.; Eckhoff, D.; German, R. y Dressler, F. (2011). "A computationally inexpensive empirical model of IEEE 802.11 p radio shadowing in urban environments", en *Proceedings of the Eighth International Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services (WONS)*, Bardonecchia, Italia, pp. 84-90.

- Treiber, M. y Kesting, A. (2010). *Verkehrsdynamik und-simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*. Springer-Verlag.
- Urquiza, L. (n.d.) NCTUns/Estinet. Disponible en <http://www.lfurquiza.com/research/NCTUns> [20 de enero de 2017].
- Vázquez Rodas, A. y De la Cruz Llopis, L. J. (2015). "A centrality-based topology control protocol for wireless mesh networks", en *Ad Hoc Networks*, vol. 24, Part. B, pp. 34-54.



# SDN: solución a los retos que enfrenta IoT

| JUAN FELIPE BOTERO VEGA, NATALIA GAVIRIA, LINA M. HINCAPIÉ\*  
| UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA, COLOMBIA

## INTRODUCCIÓN

El término «Internet de las Cosas» (IoT, por sus siglas en inglés) fue usado por primera vez por el investigador británico Kevin Ashton en 1999, mientras trabajaba en el MIT como director del Auto-ID Center y se realizaban investigaciones sobre la identificación por Radiofrecuencia en Red (RFID) y tecnologías de sensores. Lo acuñó específicamente en el contexto de la gestión de la cadena de suministro durante una conferencia en la compañía P&G. Sin embargo, el término ha ido evolucionando a medida que evoluciona la tecnología, pero la idea central de que una computadora colecte información sin intervención humana se mantiene (Ashton, 2009; Gubbi *et al.*, 2013).

IoT tiene un gran número de aplicaciones entre las que se encuentran las redes de distribución eléctrica inteligentes, la automatización de la industria, los sistemas inteligentes de transporte, los hogares inteligentes, entre otros. Con la llegada de las redes de quinta generación o 5G, se espera que este número de aplicaciones aumente, así como el número de redes y dispositivos IoT conectados, lo cual requerirá la optimización de las conexiones haciendo uso de herramientas de análisis de datos. Además, los dispositivos de comunicación Máquina a Máquina (M2M, *Machine to Machine*), que hacen parte de IoT, compartirán red con el tráfico de las comunicaciones Humano a Humano y Humano a Máquina (H2H y H2M, respectivamente), por lo cual se debe tener presente que los requerimientos de red serán diferentes según el tipo de comunicación, puesto que cada una tiene sus requerimientos particulares (Xiong *et al.*, 2016; Valdivieso *et al.*, 2014).

\* Correos electrónicos: juanf.botero@uadea.edu.co, natalia.gaviria@uadea.edu.co, lmaria.hincapie@uadea.edu.co

Por otra parte, hay que tener presente también que esta expansión de las redes IoT generará un tráfico masivo, por lo que se debe garantizar el acceso múltiple a la red, teniendo cuidado de que esta no se sobrecargue. Además, hay que asegurar que la red sea eficiente en cuanto al consumo de energía para que no se agote la batería de los dispositivos IoT y así se prolongue su tiempo de vida. Otro desafío que enfrenta IoT es el control de la red y la gestión de un gran número de dispositivos conectados a gran escala (Xiong *et al.*, 2016; Choi, 2014).

Ante estos retos, las redes definidas por *software* se presentan como una excelente alternativa para la gestión de IoT debido a la flexibilidad proporcionada para la configuración de las redes, gracias al control lógico centralizado que facilita la programabilidad de la red. En el presente capítulo se da un vistazo a la integración de SDN e IoT, las propuestas que se han hecho al respecto y los retos que quedan pendientes de abordar.

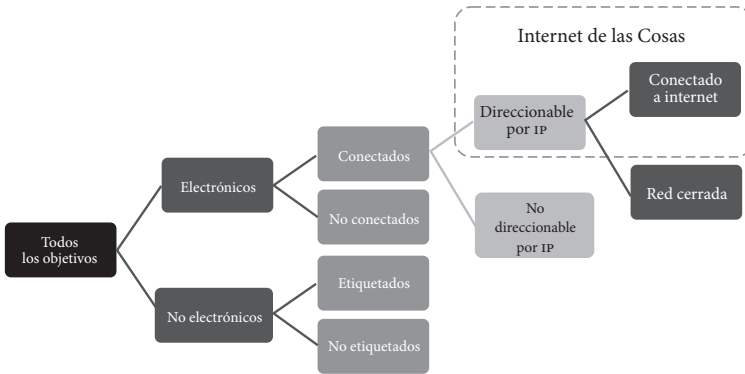
## INTERNET DE LAS COSAS

El término «Internet de las Cosas» se escucha, a menudo, sobre todo por parte de los desarrolladores y vendedores de tecnologías, pero realmente ¿qué significa este término? Choi (2014) proporciona la siguiente definición: «IoT se refiere a la interconexión de dispositivos de computación integrados e identificables de forma única dentro de la infraestructura de internet existente. El término está estrechamente relacionado con objetos inteligentes que interactúan y se comunican con otras máquinas, entornos físicos e infraestructuras». En la figura 1 se puede observar esta definición de una forma más clara.

En una red IoT, cada «cosa» se identifica por su dirección IP, esto es, lo que permite que sea identificable de forma única dentro de dicha red. Sin embargo, en IPv4 las direcciones se están agotando, así que se podría esperar que IoT sea el que dé el impulso definitivo a la adopción de IPv6.

Otra característica de IoT es su heterogeneidad; las redes IoT son el resultado de la integración de subredes IoT donde cada una tiene diferentes clases de dispositivos y conexiones con distintas capacidades, como máquinas industriales, termostatos, sensores, actuadores, carros inteligentes, *wearables*, teléfonos inteligentes y otros. Este entorno heterogéneo se debe a que, según los propósitos de la subred, se emplea determinado tipo de tecnología de red; por ejemplo, en el caso del transporte inteligente se puede usar NFC y ZIGBEE entre autos vecinos, tecnología 4G para recolectar datos de monitoreo en tiem-

**Figura 1. Definición jerárquica de Internet de las Cosas (Choi, 2014)**



po real en los *datacenters* directamente desde los vehículos, y WiFiDirect para flujo de contenido generado por el usuario, como video y audio, entre coches.

Esta heterogeneidad presenta nuevos retos para los investigadores, uno de los cuales es el compartir de manera eficiente los recursos de red entre las diferentes aplicaciones, pues varias tareas se pueden ejecutar simultáneamente con requisitos de calidad diferenciados en términos de latencia, ancho de banda y fiabilidad; por tanto, es necesario optimizar el intercambio de recursos de red. Otro reto es la interoperabilidad, pues cada tecnología usa diferentes protocolos para compartir datos. Adicionalmente, hay que asegurar la movilidad, la integración con redes celulares, la calidad de servicio, la escalabilidad, la robustez de la red, la confiabilidad y el ahorro de energía de los dispositivos IoT (Qin *et al.*, 2014).

Por otra parte, se prevé un aumento exponencial del número de dispositivos IoT. Según CISCO: «El número de dispositivos conectados a las redes IP será más de tres veces la población mundial para 2020. Habrá 3.4 dispositivos en red per cápita en 2020, frente a 2.2 dispositivos en red per cápita en 2015. Habrá 26 300 millones de dispositivos en red en 2020, frente a los 16 300 millones en 2015» (CISCO, 2016). De acuerdo con estas cifras, los operadores de red deberán enfrentarse a la complejidad de gestionar y controlar una red saturada y heterogénea, y si no se toman medidas desde ahora, se podría dar en algún momento una paralización de la red, porque las redes actuales son inflexibles, difíciles de reconfigurar, con poca capacidad de expansión y con pocas oportunidades de innovar para ir al ritmo de las crecientes demandas de las redes IoT (Sood, Yu y Xiang, 2016).

Este aumento del número de dispositivos IoT implica también una transformación en el tipo de tráfico que transportarán las redes, pues estos ya no son solo consumidores en la red, sino que también son generadores de contenido, lo cual es un cambio de paradigma debido a que, hasta ahora, la mayor parte de tráfico es generado por humanos interactuando con computadoras, servidores y objetos, H2M, o humanos interactuando con humanos, H2H. Sin embargo, con M2M los objetos progresivamente generarán más y más tráfico.

Por todo lo anterior, tanto la academia como la industria han puesto su mirada en SDN como solución a los desafíos que conlleva la implementación a gran escala de redes IoT.

## REDES DEFINIDAS POR SOFTWARE

SDN es una arquitectura de red que elimina la rigidez de las redes actuales. El desacople del plano de control del plano de datos permite gestionar la red de manera flexible, adaptándose a las necesidades de los usuarios. Además, gracias a la centralización lógica del controlador se puede tener una visión global de la red, lo que le permite mejorar y adaptar sus políticas dinámicamente y en tiempo real, según los requerimientos de la red o del cliente. SDN tiene el potencial de ayudar a construir la infraestructura de red inalámbrica que demanda IoT. Esto les permitirá a los operadores una mayor agilidad, la reducción de costos de operación, un ahorro considerable en equipos de red físicos, el despliegue de nuevos servicios y el aseguramiento de la calidad de los mismos.

SDN supera otras arquitecturas que se han propuesto para permitir la interoperabilidad de los elementos de sistemas de comunicación heterogéneos, sin importar el fabricante, como es el caso de CORBA (*Common Object Request Broker Architecture*), una arquitectura independiente del proveedor que funciona como soporte a multitud de aplicaciones abiertas en ambientes de *software* distribuidos y heterogéneos (Barrera, 2017). Sin embargo, SDN va más allá de CORBA, pues permite la programabilidad en las redes, mientras que esta última solo describe los servicios de los equipos para que se puedan comunicar entre sí.

## Redes Inalámbricas y Celulares Definidas por *Software*

Originalmente SDN fue propuesto para redes cableadas, pero en los últimos años se han hecho muchos esfuerzos para migrar SDN a las redes inalámbricas

y celulares a fin de llegar a lo que se conoce como Redes Inalámbricas Definidas por *Software* (SDWN, *Software-Defined Wireless Network*) y Redes Móviles Definidas por *Software* (SDMN, *Software-Defined Mobile Network*). Esto aportará grandes beneficios a las redes inalámbricas y celulares, debido a que estas, como se ha mencionado anteriormente, están en un periodo de expansión y se han vuelto cada vez más complejas, por lo que se hace necesario gestionar estas redes de manera sencilla y eficiente. Entre los esfuerzos que se han realizado para implementar SDWN y SDMN están OpenRadio, OpenRoad, Odin, OpenRAN, SoftRAN, SoftCell, CellsDN, SoftMoW, CROWD, MobileFlow, SoftNet y otros. A continuación, se explicará brevemente en qué consisten algunas de estas propuestas:

### *OpenRadio*

Es un diseño para un plano de datos programable en redes inalámbricas. Construido alrededor de una plataforma de *hardware* básico *multi-core*, el componente principal de OpenRadio es una capa de abstracción de *software* que expone una interfaz modular y declarativa para programar las capas PHY (banda-base) y MAC. Un operador describe un protocolo definiendo reglas para hacer coincidir subconjuntos de flujos de tráfico y especificando acciones para procesarlos. Las reglas son predicados lógicos sobre parámetros de paquetes, tales como campos de cabecera, intensidad de señal recibida, frecuencia de canal y otros campos que pueden ser programados. Las acciones describen comportamientos como la codificación/decodificación de datos y la programación del tráfico en el canal. OpenRadio puede ser visto como el OpenFlow para redes inalámbricas (Bansal *et al.*, 2012; Kreutz *et al.*, 2015).

### *OpenRoads*

También conocida como OpenFlow Wireless, es una plataforma para la innovación y el despliegue realista de servicios. Fue concebida con el propósito de llevar OpenFlow a la mayor cantidad de investigadores de redes inalámbricas. Esta plataforma permite construir gestores de movilidad, controladores de red y nuevos algoritmos de enrutamiento, además de ejecutar varios experimentos simultáneamente en una red en producción y hacer traspasos entre diferentes tecnologías inalámbricas (Yap *et al.*, n.d).

## *Odin*

Es una solución basada en SDN con una abstracción de programación que puede proporcionar las características que las redes empresariales y de proveedores necesitan. Cierra la brecha entre la gama de características requeridas por los operadores de red y la falta de programación en las redes WiFi de hoy en día. Odin provee una plataforma para el desarrollo de servicios WLAN empresariales típicos, tales como gestores de movilidad y balanceadores de carga, y lo hace como «aplicaciones de red» (Schulz-Zander, n.d.).

## *OpenRAN*

Se trata de una arquitectura de Red de Acceso por Radio (RAN, *Radio Access Network*) definida por *software* a través de la virtualización. La arquitectura propuesta alcanza una completa virtualización y programación, lo que hace que RAN sea más abierto, controlable, flexible y evolutivo (Yang *et al.*, 2013).

## *SoftRAN*

*Software Defined Radio Access Networks* es un plano de control centralizado, definido por *software* para RAN que abstrae todas las estaciones base en un área geográfica local como una gran estación base virtual compuesta por un controlador central y elementos de radio (estaciones base físicas). Es una extensión de OpenRoads (Gudipati *et al.*, 2013).

## *SoftCell*

Es una arquitectura escalable para soportar políticas de gran precisión para dispositivos móviles en redes de núcleo celular. *SoftCell* emplea dos técnicas que lo diferencian de sus antecesores y son la agregación multidimensional, que reduce las tablas de flujos en los *switches*, y el borde de acceso inteligente/borde de puerta de acceso mudo, que consiste en realizar la clasificación de paquetes en el borde de acceso en lugar de hacerlo en la puerta de acceso de internet (Jin *et al.*, 2013).

## *SoftMoW*

Propone una jerarquía de controladores SDN padres e hijos para enrutar más eficientemente el tráfico celular. *SoftMoW* reemplaza los costosos e inflexibles dispositivos *hardware*, tales como la puerta de enlace de Red de Datos de Paquete (PGW, *Packet Data Network*), con los *switches* SDN (Goransson, Black y Culver, 2016).

## *MobileFlow*

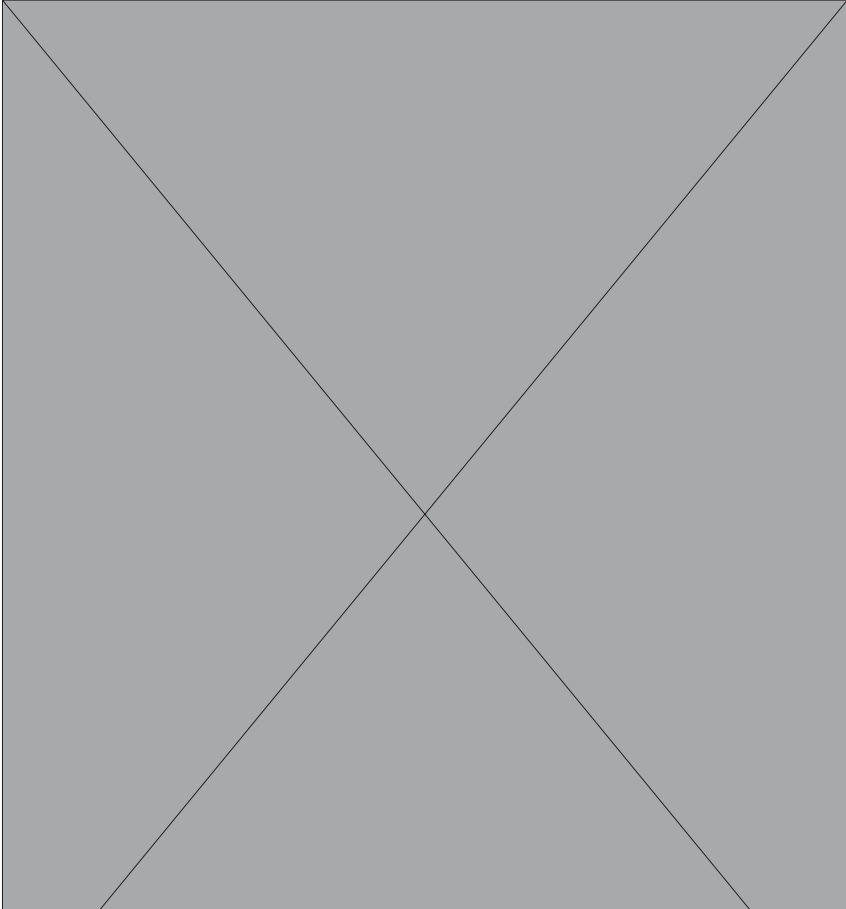
Es una modificación de SDN OpenFlow para el núcleo de la red celular móvil. Está compuesto por motores de reenvío (MFFE) y un controlador (MFC). Los MFFES son conmutadores de grado portador con funcionalidad avanzada, configurados por el MFC para reenviar el tráfico del usuario a diferentes *middleboxes* (por ejemplo, almacenamiento en caché de video) a través de la red (Ameigeiras *et al.*, 2015).

En la figura 2 se resumen las propuestas para habilitar SDN en redes celulares e inalámbricas y de esta forma hacer frente a los desafíos que se han comenzado a presentar con el incremento exponencial del tráfico en ese tipo de redes.

## INTEGRACIÓN DE SDN E IOT

La arquitectura básica de la integración de SDN e IoT puede observarse en la figura 3 y consiste en agregar un controlador IoT al plano de control, además del controlador SDN. Si un objeto IoT se quiere comunicar con otro, el controlador IoT obtiene la información necesaria para definir diferentes reglas de comunicación de los agentes del objeto solicitante y encuentra el objeto con el cual quiere establecer la comunicación. Luego, emplea un algoritmo de enrutamiento y diferente tipo de información del controlador SDN para calcular la ruta hasta ese objeto. Después de establecer y definir las reglas de reenvío, el controlador IoT las envía al controlador SDN, el cual, a su vez, las lleva a los dispositivos del plano de datos. Entonces, aunque los objetos que quieren comunicarse no tengan protocolos compatibles y estén en redes diferentes, los dispositivos de reenvío a través de la ruta hacen una traducción que permite que el receptor entienda el mensaje que se le ha transmitido (Jararweh *et al.*, 2015).

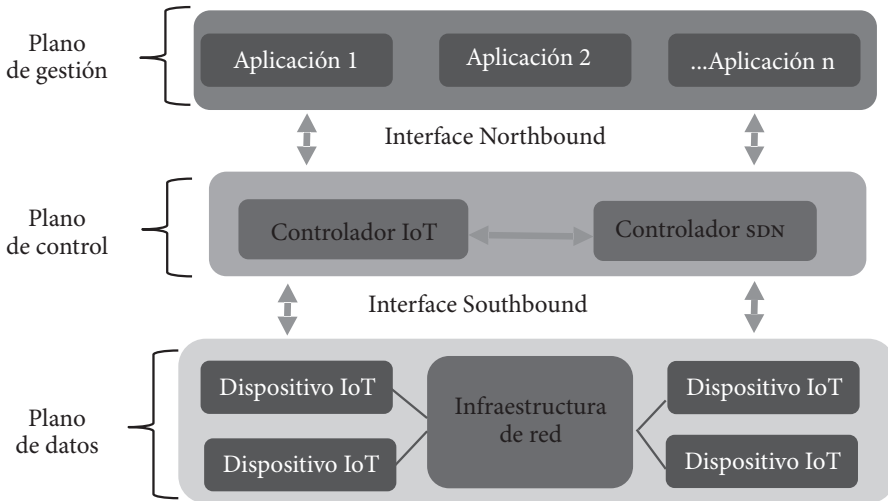
**Figura 2. Objetivos y años de lanzamiento de algunas propuestas para redes inalámbricas y celulares definidas por *software***



### Propuestas para la Integración de SDN e IoT

Poco a poco se han comenzado a desarrollar propuestas para lograr la integración de IoT y SDN. Una de estas propuestas es hecha por Jararweh *et al.* (2015), en donde se abordan cuatro retos que enfrenta IoT: control, gestión, almacenamiento y seguridad. Para esto, ellos toman los Sistemas Definidos por Software (SDSys, *Software Defined Systems*) que abarcan SDN, Almacenamiento Definido por Software (SDStore, *Software Defined Store*) y Seguridad

**Figura 3. Arquitectura típica de la integración de SDN e IoT**



Definida por Software (SDsec, *Software Defined Security*) y con base en ellos elaboran un esquema de IoT Definido por Software (sDIoT, *Software Defined IoT*). La propuesta consiste en una capa física que contiene todos los dispositivos *hardware*, luego está la capa de control que es el núcleo de la propuesta y allí están ubicados todos los controladores definidos por *software*: controlador IoT, controlador SDN, controlador SDstore y el controlador SDsec, y por último, está la capa de aplicaciones.

Otra propuesta para la integración de IoT y SDN la realizan Qin *et al.* (2014), quienes presentan una arquitectura basada en SDN para las tareas IoT en la que describen un controlador IoT-SDN para gestionar entornos dinámicos y heterogéneos de múltiples redes, como el transporte, por ejemplo. Los autores prueban su modelo a través de simulación, pero su meta es implementarlo en un gran *testbed* de redes de vehículos eléctricos de IoT y desarrollar herramientas más seguras y sofisticadas para asistir el aprovisionamiento de recursos y control de red en tiempo real. Por su parte, Omnes *et al.* (2015) proponen una arquitectura de IoT multicapa que combina SDN y NFV, e ilustran como la arquitectura propuesta es capaz de hacer frente a algunos de los desafíos en IoT. Sándor, Genge y Sebestyén-Pán (2015) proponen también una arquitectura para la integración de IoT y SDN, cuya meta es mejorar la capacidad de recuperación de la red ante una falla; para ello, usan topologías de re-

des híbridas donde combinan componentes SDN con segmentos de topología donde no se utiliza SDN, sino que se despliegan puntos de entrada y bordes de comunicación con redundancia. Para probar la propuesta, los autores realizan experimentación a escala de laboratorio sobre topologías de red reales.

Un tema que se debe tener muy presente a la hora de integrar IoT con SDN es la movilidad; sin embargo, hasta el momento las propuestas en este escenario son muy pocas. Una de ellas la hacen Wu *et al.* (2015), quienes plantean un sistema SD-IoT llamado UbiFlow para el control de flujo ubicuo y gestión de la movilidad en redes heterogéneas urbanas. UbiFlow se basa en controladores distribuidos, que son asignados a determinada área geográfica, y de esta manera se divide SDN a escala urbana. A través de la simulación y del *testbed* de redes inalámbricas ORBIT, comprueban su efectividad para la gestión de la movilidad y la programación de flujos.

Otro aspecto que demanda especial atención en la integración de IoT y SDN es la seguridad. Una de las propuestas que hay al respecto es hecha por Chakrabarty, Engels y Thathapudi (2015), donde presentan Black SDN, una arquitectura de SDN para redes y comunicaciones seguras en IoT.

El procesamiento eficiente de datos también es un tema a considerar en la integración de IoT y SDN. Xu, Mahendran y Radhakrishnan (2016) plantean una arquitectura para la computación de niebla basada en SDN; de esta forma el procesamiento de datos recae en los *switches* de borde, lo que mejora la toma de decisiones ante eventos críticos. Los autores prueban su propuesta a través de un montaje experimental, pero solo consideran un escenario alámbrico.

## Ventajas de la Integración de SDN e IoT

En Sood, Yu y Xiang (2016), los autores presentan las siguientes ventajas de integrar SDN e IoT:

- SDN tiene la capacidad de enrutar el tráfico de una red de manera inteligente gracias a que cuenta con una visión global de la red debido al controlador lógico centralizado, lo que le permite elegir rutas menos congestionadas que están siendo subutilizadas y enviar el tráfico por ellas. Esto ayuda a evitar los cuellos de botellas en la red y hacer un uso más eficiente de los recursos de la red.

- Un aspecto muy importante de IoT es la recolección y análisis de datos para la toma de decisiones, lo cual será simplificado por la integración con SDN.
- El despliegue de SDN en IoT proveerá visibilidad de los recursos de la red y la gestión del acceso basado en usuario, grupo, dispositivo y aplicación, lo que eventualmente permitirá el intercambio de la capacidad de datos entre usuario e incluso entre dispositivos.
- Se están desarrollando algoritmos en SDN para construir un analizador de patrones de tráfico efectivo, el cual simplifique las herramientas de recolección de datos de los dispositivos IoT. Esto fortalecerá la capacidad de control de la red.
- Con la SDWN, las redes IoT pueden ser más ágiles y escalables, basadas en la demanda.

## Estandarización

El proceso de estandarización de IoT y SDN todavía está en una etapa muy temprana, pues antes debe superar varios desafíos, entre ellos la competición entre varias alianzas que tratan de dominar el proceso para imponer un estándar IoT global (Bizanis y Kuipers, 2016). La estandarización es un tema de suma importancia en este proceso de integración de IoT y SDN, dado que permitirá la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes vendedores y hará más sencillos y menos costosos los despliegues de las redes. Para afrontar este desafío, Thubert, Palattella y Engel (2015) proponen una arquitectura, planteada por el grupo de trabajo 6TiSCH de IETF, que está habilitada para IPv6 en aplicaciones IoT industriales y basada en SDN (Thubert y Watteyne, n.d.).

## Aplicaciones de la Integración de IoT y SDN

### *Monitoreo urbano inteligente*

Liu *et al.* (2015) proponen una arquitectura SDIoT para el monitoreo urbano inteligente. Esta arquitectura desacopla las aplicaciones de sensado urbano de la infraestructura física. Se diseñan controles centralizados para manejar

los dispositivos físicos y proveer Interfaces de Programación de aplicaciones (APIs, *Application Programming Interface*) de adquisición de datos, transmisión y servicios de procesamiento para desarrollar aplicaciones urbanas de monitoreo. Con estas propiedades, varias aplicaciones pueden coexistir en la misma infraestructura compartida y cada una puede solicitar a los controladores la personalización de su adquisición de datos, transmisión y procesamiento bajo demanda, mediante la generación de configuraciones específicas de los dispositivos físicos.

Por ejemplo, en cierta ciudad se desea hacer una implementación de esta arquitectura para monitorear los niveles de ruido, el grado de polución en el aire y el estado del tráfico en las principales vías. Según la arquitectura SDIoT, se tendrían tres capas: una de infraestructura física, una de control y una de aplicación. En la capa de infraestructura física se ubicaría la plataforma y red de sensores, la red de transporte de datos y la nube o un centro de almacenamiento físico; la capa de control estaría compuesta por tres controladores: uno para el sensado, lo cual conformaría el servicio de adquisición de datos, otro para la red de tráfico de datos, que conformaría el servicio de transmisión de información, y por último, estaría el controlador de la nube o centro de almacenamiento, el cual conformaría el servicio de procesamiento de información. Las dos primeras capas estarían comunicadas mediante una interfaz Southbound. La tercera capa estaría conformada por un conjunto de aplicaciones de monitoreo, una para el transporte, otra para el aire y otra para los niveles de ruido. Esta capa estaría conectada a la de control a través de una interfaz Northbound. Si se requieren los niveles de ruido en cierta zona de la ciudad, la capa de aplicación envía una solicitud de adquisición de esos datos al controlador, y luego este, a través de la red, se comunica con los sensores y capta la información, la cual se transmite a la nube a través de la red para ser procesada y almacenada. En todo este proceso, los controladores están pendientes de que cada proceso se realice de forma óptima. Luego de procesada la información, se pasa el reporte a la capa de aplicación y, según las políticas que se hayan definido, se toman las acciones pertinentes.

### *Cuidado de salud inteligente*

Hu *et al.* (2015) proponen una estructura de Red de Cuidados de Salud Definida por Software (SDHN, *Software Defined Healthcare Networks*). Esta propuesta

se basa en el concepto de SDN e integra los dispositivos de red, los dispositivos *wearables*, plataformas de sensores, robots y la nube, y soporta la vigilancia remota de la salud y aplicaciones de cuidados de salud inteligente. La propuesta consiste en un controlador centralizado para gestionar los dispositivos físicos y proveer una interfaz para la recolección, transmisión y procesamiento de datos a fin de desarrollar una aplicación para vigilancia de la salud más flexible y personalizable.

### *Hogares inteligentes*

En Kim y Lee (2015) se definen cuatro tipos de relaciones sociales entre IoTs: IoT-IoT, IoT-Red, IoT-Servicio e IoT-Espacio físico. Las relaciones pueden ser usadas para el descubrimiento de dispositivos IoT, servicios y recursos. El objetivo de estas relaciones es realizar una mejor gestión de los dispositivos en una red IoT y localizar fallas de manera rápida y eficiente. El controlador SDN recolecta información de los paquetes que pasan a través de los *switches* SDN y realiza una gráfica de estatus que contiene información de cada dispositivo IoT del hogar. Una aplicación de hogar en la nube genera automáticamente las cuatro relaciones, lo que reduce la carga de los usuarios y los proveedores de servicio. Otra investigación en este campo es lo que se conoce como Controlador de Entorno Inteligente (SEC, *Smart Environment Controller*), el cual consiste en crear una separación entre el plano de datos, de control y gestión y el de aplicación. Los dispositivos físicos son presentados como Objetos Virtuales (VO, *Virtual Objects*) para ocultar los dispositivos específicos subyacentes, mientras el controlador de red permite la comunicación controlada entre dispositivos gracias a una programación dinámica de la puerta del enlace del hogar, basada en OpenvSwitch (OVS) a través de los comandos OpenFlow. El SEC actúa como un *software* intermediario entre el plano de aplicaciones y el de datos, y recibe comandos simples por parte del usuario para autorizar comunicaciones entre grupos de dispositivos llamados Comunidades de Objetos Virtuales (CoVo, *Community of Virtual Objects*). La configuración de red resultante para cada CoVo es por tanto llamada LAN Definida por Software (SD-LAN): todos los dispositivos específicos del CoVo pueden comunicarse como si estuvieran sobre la misma LAN física mientras están aislados de dispositivos no participantes.

## *Entornos inteligentes*

Ahmed *et al.* (2016) definen lo que es un entorno inteligente como «un pequeño mundo conectado en el que los dispositivos enlazados con sensores funcionan de manera colaborativa para hacer que la vida de los seres humanos sea cómoda». Los entornos inteligentes basados en IoT son edificios, transporte, ciudades, salud, industria, redes eléctricas y hogares. SDN juega un papel muy importante para el desarrollo de estos entornos, ya que dos de sus desafíos son, primero, la baja latencia y disponibilidad de ancho de banda para asegurar la precisión en su funcionamiento, y segundo, se requiere interoperabilidad de los equipos, *software* y *hardware* abierto, para que las topologías sean flexibles y se pueda dar una rápida evolución.

## DESAFÍOS DE LA INTEGRACIÓN DE IOT Y SDN

### Seguridad de las Redes IoT y SDN

Tanto IoT como SDN tienen puntos vulnerables a sufrir ataques de seguridad. IoT es más sensible a un ataque y, por eso, la industria le ha prestado una gran atención a esta problemática. Como ejemplos de puntos débiles están los métodos de intercambio de claves privadas o públicas del Estándar de Encriptación Avanzado (AES, *Advanced Encryption Standard*), la intrusión a través de los dispositivos IoT y la obtención de las claves previamente establecidas a través de ingeniería inversa. En el caso de SDN, también existen riesgos; uno de ellos es que el tamaño de las tablas de flujo de los *switches* sea limitado, por lo que estos podrían manejar solo una cantidad dada de flujos en un tiempo determinado. De esta forma, la red es vulnerable a sufrir un ataque de denegación de servicio, sobrecargando los *switches*, haciendo que los flujos que lleguen sean descartados y, por ende, que la red colapse. Otro caso que puede ocurrir es que un switch sea convertido en un bot o máquina zombie, a través de la cual se hagan operaciones maliciosas en la red. Esto último también puede ocurrir en la red IoT, la cual puede estar compuesta de millones de dispositivos. Ahora, si los piratas informáticos logran acceder al controlador podrían causar graves daños a toda la red y dejarla fuera de servicio. Por eso es necesario analizar a fondo y darles solución a las vulnerabilidades que presentan tanto IoT como

SDN en cuanto a seguridad, antes de realizar el despliegue de su integración (Sood, Yu y Xiang, 2016).

## Escalabilidad de las redes IoT y SDN

Otro desafío que hay que enfrentar es la escalabilidad debido a que las redes IoT mantienen tráfico muy variable y están en constante crecimiento, así que la arquitectura SDN que se proponga debe ser capaz de adaptarse a estos cambios sin perder calidad. Uno de los inconvenientes que presenta SDN, en su funcionamiento tradicional, es el proceso de instalación de reglas y actualización de las tablas de flujo en los *switches*. Esto toma tiempo de procesamiento, lo que puede generar retrasos adicionales en las transacciones de flujos de extremo a extremo. Por otra parte, también se debe tener en cuenta el ancho de banda entre cada *switch* y el controlador, ya que las redes IoT son muy sensibles a esto. Además, se debe considerar el tamaño y el tipo de flujo que transportará la red y la ubicación y diseño del controlador, entre otros aspectos necesarios para garantizar escalabilidad (Sood, Yu y Xiang, 2016).

## Inspección Profunda de Paquetes

OpenFlow no soporta la Inspección Profunda de Paquetes (DPI, *Deep Packet Inspection*) porque los campos de coincidencia definidos hasta el momento están limitados a la cabecera de los paquetes. El uso común de DPI incluye interceptación legal, publicidad dirigida y aplicación de derechos de autor. En seguridad, es de gran utilidad poder analizar de manera profunda los paquetes y según el chequeo dejarlos pasar o no (Sood, Yu y Xiang, 2016).

## Necesidad de hacer frente a estos desafíos

IoT está cobrando cada vez más fuerza e interés en diferentes ámbitos; ya no es solo un concepto, sino que ya es una realidad tangible, y una muestra de ello es la creciente tendencia de búsqueda en Google en comparación con términos similares como se puede observar en la figura 4. Esto da cuenta de que IoT ya no es solo un término reservado para investigadores o para proveedores o

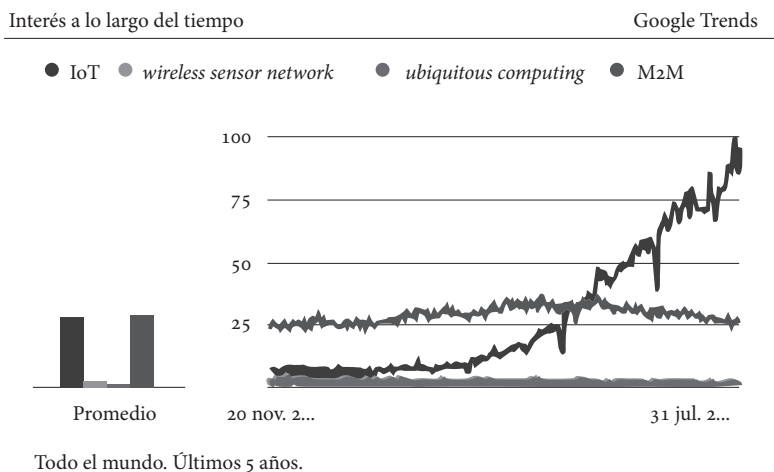
vendedores de tecnología. Ahora es un término que ha llegado a despertar el interés por parte de los usuarios, quienes esperan disfrutar pronto de los beneficios de las redes IoT.

Por otro lado, hay un gran apoyo por parte de la Open Networking Foundation (ONF) hacia los desarrollos que se hagan en relación con la implementación de SDN en redes inalámbricas y, de hecho, tienen un proyecto de redes móviles y celulares en el cual recolectan los casos de uso y determinan los requerimientos de arquitectura y protocolos. Además, la ONF ha aprobado seis laboratorios para probar los nuevos diseños y aplicaciones en SDN, incentivando los desarrollos y la innovación en esa área (Sood, Yu y Xiang, 2016), (OPEN NETWORKING FOUNDATION, n.d.)

### CASO DE USO-VANET

Las Vehicular Ad hoc Networks (VANET) son un tipo de redes en las cuales los vehículos constituyen los nodos de dicha red y permiten brindar servicios como entretenimiento, comodidad, rutas de viaje eficientes, seguridad vial y un mejoramiento del tráfico. En VANET se presentan básicamente dos tipos de

**Figura 4. Tendencias de búsquedas en Google en los últimos 5 años para los términos IoT, wireless sensor network, ubiquitous computing y M2M (Google, n.d.)**



comunicaciones: comunicación Vehículo a Vehículo (V2V) y comunicación Vehículo a Infraestructura (V2I), en la cual los vehículos se conectan a unos dispositivos conocidos como RSUS (*Road-side-Units*) (Hartenstein y Laberteaux, 2008).

Las VANET presentan varios desafíos que son necesarios superar para que puedan seguir creciendo y continuar desplegando todos sus servicios con la QoS (*Quality of Service*) requeridas. Entre esos desafíos están la escalabilidad, la falta de flexibilidad, el proveer un tráfico balanceado y el utilizar la red de manera eficiente. Todo esto se debe a la rigidez de las arquitecturas que se han implementado tradicionalmente. Como solución, se ha propuesto emplear SDN y así hacer de las VANET unas redes más sencillas de gestionar y expandir, además de abrir la posibilidad a la implementación de nuevos servicios y el mejoramiento de los actuales. A las arquitecturas basadas en SDN para VANET se les conoce como arquitecturas de Redes Vehiculares Definidas por Software (SDVN, *Software-Defined Vehicular Networks*).

En la literatura se puede hallar una gran cantidad de artículos donde se proponen diversas arquitecturas y servicios y se analizan otros aspectos relativos a la integración de SDN y VANET. A continuación, se hará referencia a algunos de esos artículos con el fin de que el lector conozca algunas de las propuestas que se han hecho al respecto. Ku *et al.* (2014) estudian la arquitectura, los beneficios y operaciones en la integración de SDN y VANET en cuanto a los servicios y las nuevas funcionalidades que se podrían ofrecer gracias a esta integración. Además, se presenta un caso de uso sobre el enrutamiento para mostrar los beneficios de la arquitectura resultante de la integración de VANET y SDN en el reenvío de datos en escenarios multitrayectoria. Por su parte, en Alioua, Senouci y Moussaoui (2017) se aborda el tema de cómo hacer posible SDN en entornos V2V. Para ello, se propone una arquitectura distribuida basada en SDN, la cual es escalable y está basada en clústeres con controladores móviles distribuidos y un mecanismo de recuperación alternativa, basado en la anticipación de fallas y en la agrupación autoorganizada. Truong, Lee y Ghamri-Doudane (2015) proponen una arquitectura basada en SDN y Fog Computing —es decir, computación en la niebla— llamada FSDN (*Fog Software Defined Network*). En esta arquitectura, Fog Computing permite ofrecer servicios que son sensibles al retardo y de reconocimiento de la ubicación. La arquitectura propuesta pretende dar solución a los desafíos que enfrentan las VANET aumentando las comunicaciones V2V, V2I y vehículo a estación base, y que el control centralizado de SDN tenga en cuenta las características heterogéneas de este tipo de redes.

Las soluciones basadas en SDN que se han propuesto prometen dar respuesta a los retos que enfrentan las VANET; sin embargo, la conclusión general de estas propuestas es que aún hay un largo camino por recorrer y, por ende, queda abierto un campo investigativo muy amplio en lo que respecta a la asignación de recursos, el diseño de protocolos, las técnicas para afrontar fallas en la conexión entre el controlador SDN y los vehículos, entre otros aspectos necesarios para una integración fiable y eficiente de las VANET y SDN.

## CONCLUSIONES

La integración de IoT y SDN se presenta como una solución apropiada para contrarrestar las dificultades que se generarán con el despliegue de las redes IoT, las cuales se prevé serán muy complejas debido a la gran cantidad de dispositivos y tecnologías que deberá gestionar. SDN, por tanto, presenta un enorme potencial de oportunidades, entre ellas el permitir una visión global de la red IoT lo que facilita el control de la misma según las necesidades del cliente, el tipo o la cantidad de tráfico, entre otras características de la red. Sin embargo, la integración de IoT y SDN aún es incipiente, pues hay muchos aspectos que requieren de madurez, como son la arquitectura de red, la definición de protocolos, el diseño del controlador, la estandarización, entre otros.

## REFERENCIAS

- Ahmed, E.; Yaqoob, I.; Gani, A.; Imran, M. y Guizani, M. (2016). "Internet-of-things-based smart environments: state of the art, taxonomy, and open research challenges", en *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, núm. 5, pp. 10-16.
- Alioua, A.; Senouci, S. M. y Moussaoui, S. (2017). "dSDiVN: a distributed Software-Defined Networking architecture for Infrastructure-less Vehicular Networks", en *International Conference on Innovations for Community Services, Communications in Computer and Information Science*, vol. 717, Springer, pp. 56-67.
- Ameigeiras, P.; Ramos-Munoz, J. J.; Schumacher, L.; Prados-Garzon, J.; Navarro-Ortiz, J. y Lopez-Soler, J. M. (2015). "Link-level access cloud architecture design based on SDN for 5G networks", en *IEEE Network*, vol. 29, núm. 2, pp. 24-31.

- Ashton, K. (2009). "That 'internet of things' thing", en *RFiD Journal*, vol. 22, núm. 7, pp. 97-114.
- Bansal, M.; Mehlman, J.; Katti, S. y Levis, P. (2012). "Openradio: a programmable wireless dataplane", en *Proceedings of the First Workshop on Hot topics in Software Defined Networks (HotSDN)*, Helsinki, Finland, pp. 109-114.
- Barrera, C. M. (2017). "Tecnología CORBA (*Common Object Request Broker Architecture*)", en *Nomadas*. Disponible en [www.mcrisman.telecomunicaciones.com](http://www.mcrisman.telecomunicaciones.com) [03 de abril de 2017].
- Bizanis, N. y Kuipers, F. A. (2016). "SDN and Virtualization Solutions for the Internet of Things: A Survey", en *IEEE Access*, vol. 4, pp. 5591-5606.
- Chakrabarty, S.; Engels, D. W. y Thathapudi, S. (2015). "Black SDN for the Internet of Things", en *Proceedings of the IEEE 12th International Conference Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS)*, Dallas, TX, USA, pp. 190-198.
- CISCO (2016). "The Zettabyte Era-Trends and Analysis". Disponible en <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html> [3 de abril de 2017].
- Choi, A. J. (2014). "Internet of things: Evolution towards a hyper-connected society", en *Proceedings of the IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC)*, KaoHsiung, pp. 5-8.
- GOOGLE (n.d.). "Google Trends". Disponible en <https://trends.google.com/trends/> [25 de mayo de 2017].
- Goransson, P.; Black, C. y Culver, T. (2016). *Software Defined Networks: A Comprehensive Approach*. 2nd Ed., Morgan Kaufmann.
- Gubbi, J.; Buyya, R.; Marusic, S. y Palaniswami, M. (2013). "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions", en *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, núm. 7, pp. 1645-1660.
- Gudipati, A.; Perry, D.; Li, L. E. y Katti, S. (2013). "SoftRAN: Software defined radio access network", en *Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking (HotSDN)*, Hong Kong, China, pp. 25-30.
- Hartenstein, H. y Laberteaux, K. P. (2008). "A tutorial survey on vehicular ad hoc networks", en *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, núm. 6, pp. 164-171.
- Hu, L.; Qiu, M.; Song, J.; Hossain, M. S. y Ghoneim, A. (2015). "Software defined healthcare networks", en *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, núm. 6, pp. 67-75.
- Jararweh, Y.; Al-Ayyoub, M.; Darabseh, A.; Benkhelifa, E.; Vouk, M. y Rindos, A. (2015). "Sdiot: a software defined based internet of things framework", en

- Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 6, núm. 4, pp. 453-461.
- Jin, X.; Li, L. E.; Vanbever, L. y Rexford, J. (2013). "Softcell: Scalable and flexible cellular core network architecture", en *Proceedings of the 9th ACM Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies (CONEXT)*, Santa Barbara, California, USA, pp. 163-174.
- Kim, Y. y Lee, Y. (2015). "Automatic generation of social relationships between Internet of Things in smart home using SDN-based home cloud", en *Proceedings of the IEEE 29th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*, Gwangju, South Korea, pp. 662-667.
- Kreutz, D.; Ramos, F. M. V.; Verissimo, P. E.; Rothenberg, C. E.; Azodolmolky, S. y Uhlig, S. (2015). "Software-defined networking: A comprehensive survey", en *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, núm. 1, pp. 14-76.
- Ku, I.; Lu, Y.; Gerla, M.; Gomes, R. L.; Ongaro, F. y Cerqueira, E. (2014). "Towards Software-Defined VANET: Architecture and Services", en *Proceedings of the 13th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (MED-HOC-NET)*, Piran, Slovenia, pp. 103-110.
- Liu, J.; Li, Y.; Chen, M.; Dong, W. y Jin, D. (2015). "Software-defined internet of things for smart urban sensing", en *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, núm. 9, pp. 55-63.
- Omnes, N.; Bouillon, M.; Fromentoux, G. y Le Grand, O. (2015). "A programmable and virtualized network & its infrastructure for the internet of things: How can nfv & sdn help for facing the upcoming challenges", en *Proceedings of the 18th International Conference on Intelligence in Next Generation Networks (ICIN)*, Paris, France, pp. 64-69.
- Open Networking Foundation (n.d.). "Wireless & amp; Mobile". Disponible en <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/working-groups/charter-wireless-mobile.pdf> [25 de mayo de 2017].
- Qin, Z.; Denker, G.; Giannelli, C.; Bellavista, P. y Venkatasubramanian, N. (2014). "A software defined networking architecture for the internet-of-things", en *Proceedings of the IEEE Network Operations and Management Symposium (NOMS)*, Krakow, Poland, pp. 1-9.
- Sándor, H.; Genge, B. y Sebestyén-Pál, G. (2015). "Resilience in the Internet of Things: The Software Defined Networking approach", en *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, Cluj-Napoca, Romania, pp. 545-552.

- Sood, K.; Yu, S. y Xiang, Y. (2016). "Software-defined wireless networking opportunities and challenges for Internet-of-things: A review", en *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, núm. 4, pp. 453-463.
- Schulz-Zander, J. (n.d.). "Software-Defined Wireless Networking". Disponible en <https://sdn.inet.tu-berlin.de/> [10 de abril de 2017].
- Thubert, P.; Palattella, M. R. y Engel, T. (2015). "6TISCH centralized scheduling: When SDN meet IoT", en *Proceedings of the IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, Tokyo, Japan, pp. 42-47.
- \_\_\_\_\_ y Watteyne, T. (n.d.). "6Tisch Status Pages". Disponible en <https://tools.ietf.org/wg/6tisch/charters> [25 de mayo de 2017].
- Truong, N. B.; Lee, G. M. y Ghamri-Doudane, Y. (2015). "Software defined networking-based vehicular Adhoc Network with Fog Computing", en *Proceedings of the IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM)*, Ottawa, ON, pp. 1202-1207.
- Valdivieso Caraguay, Á. L.; Peral, A. B.; Barona López, L. I. y García Villalba, L. J. (2014). "SDN: Evolution and opportunities in the development IoT applications", en *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 10, núm 5, pp. 1-10.
- Wu, D.; Arkhipov, D. I.; Asmare, E.; Qin, Z. y McCann, J. A. (2015). "Ubi-Flow: Mobility management in urban-scale software defined IoT", en *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, Kowloon, Hong Kong, pp. 208-216.
- Xiong, X.; Hou, L.; Zheng, K.; Xiang, W.; Hossain, M. S. y Rahman, S. M. M. (2016). "SMDP-Based Radio Resource Allocation Scheme in Software-Defined Internet of Things Networks", en *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, núm. 20, pp. 7304-7314.
- Xu, Y.; Mahendran, V. y Radhakrishnan, S. (2016). "Towards SDN-based fog computing: MQTT broker virtualization for effective and reliable delivery", en *Proceedings of the 8th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*, Bangalore, India, pp. 1-6.
- Yang, M.; Li, Y.; Jin, D.; Su, L.; Ma, S. y Zeng, L. (2013). "OpenRAN: a software-defined ran architecture via virtualization", en *ACM SIGCOMM computer communication review*, vol. 43, pp. 549-550.
- Yap, K. K.; Kobayashi, M.; Underhill, D.; Seetharaman, S.; Kazemian, P. y McKeown, N. (n.d.). "The Stanford OpenRoads Deployment". Disponible en <http://yuba.stanford.edu/~peyman/docs/openroads.pdf> [3 de abril de 2017].



# Actualidad de las redes vehiculares: vehículos autónomos

| LETICIA LEMUS CÁRDENAS, NELY PATRICIA LÓPEZ MÁRQUEZ,  
MÓNICA AGUILAR IGARTUA\*  
| UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA (UPC), BARCELONA, ESPAÑA

## INTRODUCCIÓN

Desde la aparición masiva de los vehículos en las carreteras a inicios del siglo xx, la industria del automóvil ha sido una fuente continua de innovación y un motor de crecimiento económico. La combinación de diversas tecnologías en el diseño de los automóviles ha hecho posible el desarrollo de nuevos prototipos de coches autónomos sin conductor. Los vehículos autónomos comienzan a proyectarse como parte del tráfico en un futuro próximo en las ciudades inteligentes, aportando prometedores beneficios en cuanto a la mejora de la movilidad y reducción de accidentes. Los vehículos autónomos se refieren a un coche que puede conducirse sin un humano y cumplir con las principales capacidades de transporte de un vehículo tradicional.

La tecnología de vehículos autónomos involucra muchas técnicas para lograr las capacidades tradicionales de ellos, tales como la detección de los alrededores usando el radar, la luz láser, el GPS (*Global Positioning System*), la odometría (estimación de la posición de vehículos con ruedas durante la navegación) y la visión por computadora. De la misma manera, incluye un sistema de control completo para interpretar y procesar la información sensorial para identificar rutas de navegación apropiadas, acciones de parada o tomar decisiones frente a una señalización relevante (Meyer, 2015)

De acuerdo con Zakir (2016), la reducción de colisiones por tráfico es un beneficio potencial de los vehículos autónomos, al igual que los bajos costos y la disminución de la necesidad de un seguro completo. Sin embargo, el pano-

\* Correos electrónicos: leticia.lemus@entel.upc.edu, nely.lopez@entel.upc.edu, maguilar@entel.upc.edu

rama para desplegar la adopción de los vehículos autónomos no es fácil, pues existen diversos desafíos tecnológicos, además del aspecto de responsabilidad de posibles incidentes. Así, los países deberán aprobar legislaciones nuevas sobre la conducción autónoma para despejar dudas de quién es responsable en caso de accidente, si el fabricante o el dueño del AV, por lo que el seguro del automóvil se verá condicionado. Ello supondrá una inclusión gradual del automóvil autónomo en la carretera y en las calles con un escenario compartido con automóviles no autónomos.

Hoy en día, en muchas carreteras y ciudades ya existe infraestructura de tecnología de comunicación, lo que permite un potencial despliegue de servicios de telecomunicación que son la base para las nuevas funcionalidades que se planifican en los vehículos. Los AV se visualizan como unos de los mayores y prometedores avances tecnológicos en las ciudades inteligentes.

## CIUDADES INTELIGENTES Y EL VEHÍCULO AUTÓNOMO

Una ciudad inteligente consiste en una zona urbana que utiliza tecnologías de la información y comunicación para incrementar la eficiencia operacional, compartir información con la ciudadanía y mejorar tanto la calidad de los servicios ofrecidos como el bienestar de los ciudadanos.

En lo que concierne al área de transporte, una ciudad inteligente tiene la capacidad de gestionar el tráfico y monitorizar y analizar el flujo de vehículos, optimizando el funcionamiento de los semáforos para evitar que las calles se congestionen demasiado según la hora o el día de la semana; eso reduce el riesgo de accidentes de tráfico y produce una movilidad inteligente dentro de la ciudad.

De la misma manera, el ahorro de energía y su uso eficiente son temas importantes para este tipo de ciudades. Por ejemplo, el uso de sensores inteligentes para atenuar las farolas cuando no hay automóviles o peatones en las carreteras y así ahorrar energía, o el uso de energía de fuentes renovables para disminuir la contaminación en las ciudades (Rouse, 2017).

Los automóviles son parte del Sistema de Transporte Inteligente (ITS), así como de la ciudad inteligente, ya que pueden interactuar y compartir información con la infraestructura de la ciudad y con otros vehículos.

## Conducción autónoma

La sociedad de ingenieros automotrices (SAE, *Society of Automotive Engineers*) (SAE International, 2014) ha dividido el tipo de autonomía del vehículo en cinco niveles con el propósito de evaluar a los AV. En el estándar J3016 se proporciona una terminología común para la conducción automatizada, con el fin de simplificar la comunicación en este ámbito y facilitar la colaboración dentro de los dominios técnicos y políticos.

Los niveles 1 y 2 corresponden a un controlador humano que monitoriza el entorno de manejo, con características autónomas que ayudan en la dirección, la aceleración y la desaceleración. En el nivel 3, la automatización es condicional y significa que el vehículo puede conducir y monitorizar el entorno por sí mismo (sistema automatizado), pero requiere la intervención humana para responder a una solicitud del sistema de manera apropiada. En el nivel 4, se produce una elevada supervisión del entorno de conducción por parte del sistema y la intervención humana se produce solo en situaciones de emergencia. La automatización completa corresponde al nivel 5, en que el controlador humano no es necesario y el sistema de conducción lo hace todo. Podemos ver esta clasificación en la tabla 1.

## Tecnología de vehículo sin conductor

Las tecnologías incluidas en el vehículo sin conductor se pueden organizar en cinco grupos, de acuerdo con la combinación que se hace de estas (Glancy *et al.*, 2016), las cuales se describen de la siguiente forma:

- *Interfaz de usuario de vehículo o interfaz humano-máquina (HMI)*, que no ofrece más opciones que usar el vehículo sin conductor o no usarlo y seleccionar el destino del vehículo.
- *Sensores que proporcionan datos internos de operación del vehículo*. El vehículo está equipado con miles de microprocesadores de sensores para detectar y procesar el funcionamiento de varias partes del vehículo que están en comunicación con el estándar bus CAN (*Control Area Network*), que permite las comunicaciones internas entre dispositivos y componentes del vehículo (Corrigan, 2016).

TABLE I. Niveles de automatización SAE (Society of Automotive Engineers)

SAE level	Name	Narrative definition	Execution of Steering and Acceleration / Deceleration	Monitoring of Driving Environment	Fallback Performance of Dynamic Driving Task	System Capability (Driving Modes)
<i>Human driver monitors the driving environment</i>						
0	No Automation	the full-time performance by the <i>human driver</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even when enhanced by warning or intervention systems	Human driver	Human driver	Human driver	n/a
1	Driver Assistance	the <i>driving mode</i> -specific execution by a driver assistance system of either steering or acceleration/ deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	Human driver and system	Human driver	Human driver	Some driving modes
2	Partial Automation	the <i>driving mode</i> -specific execution by one more driver assistance systems of both steering and acceleration/ deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	System	Human driver	Human driver	Some driving modes
<i>Automated driving system ("system") monitors the driving environment</i>						
3	Conditional Automation	the <i>driving mode</i> -specific performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the dynamic driving task with the expectation that the <i>human driver</i> will respond appropriately to a <i>request to intervene</i>	System	System	Human driver	Some driving modes
4	High Automation	the <i>driving mode</i> -specific performance by an automated driving system of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> even if a <i>human driver</i> does not respond appropriately to a <i>request to intervene</i>	System	System	System	Some driving modes
5		the full-time performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> under all roadway and environmental conditions that can be managed by a <i>human driver</i>	System	System	System	all driving modes

Copyright © 2014 SAE International. The summary table may be freely copied and distributed provided SAE International and J3016 are acknowledged as the source and must be reproduced AS-IS.

- *Sensores que proveen ubicación y entorno vial externo.* Los vehículos modernos incluyen de serie un sistema de posicionamiento global (GPS) para obtener información sobre la ubicación en tiempo real, y se requiere información precisa sobre la ubicación dentro de unos pocos centímetros. Las tecnologías en la carretera toman una parte importante en este escenario que permite que un vehículo sin conductor obtenga información de las señales, semáforos y advertencias de la carretera.
- *Controles automáticos sobre las funciones y operaciones del vehículo.* Las operaciones del vehículo son automatizadas a través de la red por un microprocesador como actuador desencadenado por la inteligencia artificial del vehículo.
- *Inteligencia artificial.* Alta inteligencia sofisticada que proporciona al vehículo la capacidad de decidir qué control automatizado activar, de acuerdo con el análisis previo interno (Glancy *et al.*, 2016).

## Vehículo autónomo en la carretera

Existen algunos prototipos de vehículos autónomos como Tesla y Google que han demostrado recientemente que ya pueden funcionar en la carretera (Tesla, 2017; Google, 2017). Estos proyectos son las referencias más conocidas, puesto que son de los primeros en alcanzar al menos el nivel 3 de automatización. El primero ha logrado la automatización condicional, pero solo en algunos momentos es posible activar el modo de autónomo y aún es necesaria la presencia de un conductor.

El segundo recientemente ha presentado un prototipo con alto nivel de automatización, lo que significa que no es necesario un conductor (chofer), posicionándose en el nivel 4 de la SAE. Después de esto, hay más compañías que

**Figura 2. Proyecto Google: el auto sin conductor Wymo**



proclaman que tendrán sus propios vehículos autónomos en las calles dentro de pocos años.

## Enfoques de pruebas del vehículo autónomo

Esta sección provee una visión de las pruebas más relevantes sobre los vehículos autónomos dentro de escenarios realistas, llevadas a cabo en los últimos dos años.

### *Detección de obstáculos*

La detección de obstáculos en la carretera o en las calles mientras un vehículo autónomo se mueve es un factor sumamente importante a considerar y que deberá ser logrado por el propio vehículo. En un escenario real, en la carretera pueden aparecer obstáculos o señales de tráfico que el AV deberá ser capaz de detectar y, a razón de esto, realizar una acción, como reducir la velocidad, detenerse o bien tomar otro camino para esquivarlo. Considerando este aspecto, muchos estudios se han realizado en los últimos años para resolver o mejorar los requisitos para estos tipos de vehículos.

De acuerdo con los niveles de clasificación descritos anteriormente, la conducción en flotas se define como una conducción semiautomática porque contiene varias decisiones automatizadas, pero no completamente autónomas, que requieren de un sistema de asistencia que esté monitoreándolas todo el tiempo. A pesar de que la conducción no es totalmente independiente, se utilizan muchas aplicaciones de automatización como, por ejemplo, la detección de obstáculos.

Wöhler y Anlauf (2001) proponen un sistema para detectar en el entorno de tráfico el adelantamiento de vehículos, estimación de posición geográfica en autopistas y reconocimiento de peatones. Para realizar su estudio, recolectaron datos de su algoritmo de red neuronal con retardo adaptable (ATDNN, *Adaptive Time Delay Neural Network*), este fue producido por una cámara de video de escala de grises estándar, fijada detrás del parabrisas del vehículo y una computadora equipada con un capturador de fotogramas que entrega marcos intermedios. Con ATDNN, los peatones son reconocidos con buena exactitud gracias al procesamiento espacio-temporal local de las secuencias de imágenes en los módulos de clasificaciones.

Un interesante desarrollo realizado por el Grupo de Investigación de BMW en la conducción autónoma sobre las carreteras de Alemania se describe en (Aeberha *et al.*, 2015), en el cual se presenta el diseño de un prototipo de sistema de conducción automática nombrado Sistema de Conducción Altamente Automatizado (HAD). Esta propuesta se enfoca en la percepción del entorno, localización, conducción estratégica y control de vehículo, probado con tráfico real a más de 130km/h. Para lograr la detección y localización por el vehículo autónomo usan un mapa digital altamente preciso, combinado con GPS, odometría de vehículo y sensores para la detección de entorno. La conducción y el control del vehículo están relacionados con el nivel de detección de los sensores que perciben objetos, así como con los otros vehículos en la carretera. Sin embargo, el prototipo fue diseñado para la carretera, en donde los obstáculos móviles son solo otros vehículos, por lo que los peatones no están contemplados.

Otra propuesta sobre vehículos autónomos en calles urbanas se presenta en Broggi *et al.* (2015). Su prueba de vehículo sin conductor se realiza en calles urbanas públicas (*Public Road Urban Driverless-car Test*, PROUD), demostrando las negociaciones del vehículo frente a carreteras rurales estrechas de dos sentidos, cruce de peatones, semáforos, rotondas y unión de autopistas. Su propuesta mejora la experiencia de conducción a alta velocidad y despliega el modo correcto de conducción utilizando vehículos autónomos BRAiVe. Las pruebas se han realizado en un mapa real con una ruta de 13 kilómetros previamente planeada, compuesta por carretera rural, entorno urbano y autopistas, enfocándose en la habilidad del coche autónomo para seguir toda la ruta sin intervención humana, registrando la velocidad de conducción y estimando la velocidad para detectar objetos en tiempo real. Su detección dinámica de objetos se refiere a otros vehículos en la ruta.

Con enfoque en la trayectoria en tiempo real, Li *et al.* (2016) proponen un marco práctico de generación de trayectoria en tiempo real, aplicando un algoritmo para generar una trayectoria óptima. Los autores implementan una optimización gradiente no lineal a algoritmos cúbicos *B-split* para suavizar e interpolar la ruta de referencia secuencialmente, con la que usan una ruta de referencia extraída del mapa digital que se basa en la tecnología de localización LIDAR.<sup>1</sup> Las pruebas se enfocan en entornos urbanos incluyendo característi-

<sup>1</sup> LIDAR es un acrónimo de *Light Detection and Ranging in more detail or 3D laser scanning*. Desde su concepción en los sesenta, LIDAR ha sido adoptado en muchas áreas de aplicación, así

cas como mantenimiento de carril, seguimiento de vehículo, adelantamiento, evasión dinámica y estática de obstáculos.

### *Pruebas en función de la velocidad*

Encontrar la velocidad apropiada del vehículo a fin de tener un control del mismo cuando está en movimiento es otra medida en los experimentos con vehículos sin conductor.

La propuesta en Gonçalves Lins *et al.* (2016) corresponde a un sistema basado en el concepto de visión estéreo, y que fue desarrollada para medir la velocidad de los vehículos usando imágenes. El método utiliza técnicas para ubicar puntos homólogos y luego estimar la velocidad del vehículo, definiendo dos tipos de velocidades: lineal y angular.

### *Test del grado de inteligencia del vehículo*

Los niveles o capacidades del vehículo en la toma de decisiones de forma eficiente son también otra característica que se somete a prueba en los vehículos autónomos, a fin de ubicar en qué nivel de autonomía se puede posicionar. Una propuesta es la definición de un diagrama semántico de inteligencia de conducción, para observar la relación entre los escenarios de prueba, tareas y funciones del vehículo, como queda descrito en Li *et al.* (2016). Su propuesta consiste en una simulación de una plataforma de prueba que incorpora sistemas de tráfico paralelo para simular el escenario de prueba y observar cómo los vehículos interactúan con el escenario.

Otra propuesta que enfoca su estudio en aplicaciones de aprendizaje de máquina se describe en Okumura *et al.* (2016). Ellos implementan técnicas de aprendizaje de máquina basadas en entrenamiento y clasificación de datos, identificando posiciones y estados en una rotonda, y de ese modo se genera aprendizaje para la toma de decisiones.

---

como en la industria automotriz y en los proyectos de vehículos sin conductor. Disponible en <http://www.lidar-uk.com/what-is-lidar/>

## REALIDADES CON LOS VEHÍCULOS AUTÓNOMOS

La operación de los vehículos autónomos está bajo los permisos de las legislaciones de cada país que tienen interés en adoptar esta tecnología. Algunos de ellos están trabajando para establecer las normas de operación y han abierto la oportunidad de probar prototipos en sus carreteras o calles. Otros países desde hace años tienen claras las normas bajo las cuales se ha de operar la tecnología del vehículo sin conductor, como es el caso de Estados Unidos. Otros, a su vez, han prohibido la entrada de esta tecnología o bien han aplazado los permisos hasta tener claro cómo será la normativa de operación, como el caso de China (Hernández, 2017).

La operación de los vehículos autónomos ya puede verse en algunos lugares del planeta. Un claro ejemplo es el proyecto Autocits (AUTOC-ITS, 2018) realizado por Portugal, España y Francia y que se encuentra en fase de prueba; este hace uso de vías prioritarias para asegurar que los coches funcionen de forma adecuada. También se pretende avanzar hacia una legislación estándar para los vehículos autónomos en Europa. (Ver figura 3).

La tendencia de aplicabilidad del AV se dirige hacia vehículos compartidos, sobre todo para el transporte público. La empresa EasyMile (EASYSMILE, 2018) es un ejemplo de desarrollo de soluciones para transporte autónomo; tal es el caso de su modelo EZ10, un autobús autónomo desplegado ya en varios países de Asia-Pacífico, Medio Oriente, América del Norte y Europa, como se puede observar en la figura 4. Este tipo de autobús ofrece servicio de transporte a cortas distancias, comúnmente llamadas «de última milla», tanto para personas como para logística y transporte de mercancías (LIGIER Group, 2018).

**Figura 3. Vehículo autónomo utilizado con la tecnología Indra (Cerezo, 2017)**



**Figura 4. Modelo EZ10 Driveless Shuttle**



## CONCLUSIONES

Los avances en el desarrollo de tecnología para vehículos autónomos son notorios y se pronostica que en pocos años estos vehículos estarán presentes en las calles y las carreteras. Antes de su puesta en marcha, deberán realizarse pruebas exhaustivas para garantizar el funcionamiento de estos vehículos en diferentes escenarios en el mundo real.

Las pruebas y experimentos de un AV se centran principalmente en el desarrollo de algoritmos de toma de decisiones para ejecutar acciones basadas en la detección de objetos mientras están en movimiento. Un aspecto importante que se considera para las pruebas es el reconocimiento y monitoreo de señales, que le permiten al vehículo controlar y establecer la velocidad apropiada para evitar riesgos de accidentes de tráfico, como el impacto o salida de la carretera, así como para detenerse frente a señales de alto marcado o semáforos dentro de la ciudad.

El análisis de información de datos y entrenamiento es un área importante aplicable a la conducción automática, pues permite un aprendizaje previo ante diferentes situaciones o escenarios en la carretera, para así proporcionar un cierto nivel de inteligencia a los vehículos. Esto se consigue mediante el diseño de algoritmos de aprendizaje automático.

Si bien es cierto que ya existen prototipos y que los primeros vehículos autónomos se están enfocando principalmente en el transporte público con carriles exclusivos para estos, como autobuses o taxis, aún hay trabajo por hacer, ya que no solo se están adaptando las zonas de tránsito de vehículos, sino también reglas y leyes para este nuevo tipo de vehículos (Bloomberg Philanthropies, 2017; Esurance, 2017). Como se ha visto, al medir las capacidades de autonomía de un vehículo, las pruebas en escenarios mixtos son importantes, ya que la inclusión del vehículo autónomo se hará de forma gradual, es decir, habrá un escenario mixto en el que los vehículos no automáticos y los vehículos autónomos compartirán las calles y las carreteras, y para ello se debe tomar una serie de pruebas previamente aprobadas para garantizar un buen rendimiento de los vehículos autónomos.

## REFERENCIAS

Aeberha, M.; Rauch, S.; Bahram, M.; Tanzmeister, G.; Thomas, J.; Pilat, Y.; Homm, F.; Huber, W. y Kaempchen, N. (2015). "Experience, results and

- lessons learned from automated driving on Germany's highways”, en *IEEE Intelligent Transportation Systems*, vol. 7, núm. 1, pp. 42-57.
- AUTOC-ITS (2018). “Regulation Study for Interoperability in the Adoption of Autonomous Driving in European Urban Nodes”. Disponible en <https://www.autocits.eu/> [6 de marzo de 2018].
- Bloomberg Philanthropies (2017). “The Bloomberg Aspen Initiative on Cities and Autonomous Vehicles”. Disponible en <https://www.bbhub.io/dotorg/sites/2/2017/05/TamingtheAutonomousVehicleSpreadsPDFreleaseMay3rev2.pdf> [3 de enero, 2018].
- Broggi, A.; Cerri, P.; Debattisti, S.; Laghi, M. C.; Medici, P.; Molinari, D.; Panciroli, M. y Prioletti, A. (2015). “PROUD—Public Road Urban Driverless-Car Test”, en *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*, vol. 16, núm. 6, pp. 3508-3619.
- Cerezo, F. (2017). «Indra arranca el proyecto europeo del vehículo autónomo». Disponible en <http://www.elmundo.es/motor/2017/10/11/59ddd314ca4741b718b4619.html> [4 de septiembre de 2017].
- Corrigan, S. (2016). “Introduction to the Controller Area Network (CAN)”. Disponible en <http://www.ti.com/lit/an/sloa101b/sloa101b.pdf> [3 de septiembre de 2017].
- EASYMILE (2018). “For first & last mile journey”. Disponible en <http://www.easymile.com/> [6 de marzo de 2018].
- Esurance, E. (2017). “How Autonomous Cars and Buses Will Change Urban Planning”. Disponible en <http://www.govtech.com/fs/perspectives/how-autonomous-cars-buses-will-change-urban-planning-industry-perspective.html> [2 de febrero de 2018].
- Glancy, D. J.; Peterson, R. W. y Graham, K. F. (2016). *A Look at the Legal Environment for Driverless Vehicles. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*. Washington, DC: The National Academies Press.
- Gonçalves Lins, R.; Givigi, S. N. y Gardel Kurka, P. R. (2016). “Velocity Estimation for Autonomous Vehicles Based on Image Analysis”, en *IEEE Transactions on Instrumentation And Measurement*, vol. 65, núm. 1, pp. 96-103.
- GOOGLE (2017). “Self-driving car project”. Disponible en [www.google.com/selfdrivingcar](http://www.google.com/selfdrivingcar) [3 de septiembre de 2017].
- Hernández, Á. (2017). «La vuelta al mundo en coche autónomo: prohibido en India, luz verde en Europa». Disponible en [https://www.eldiario.es/hojaderouter/tecnologia/coche\\_sin\\_conductor-autonomo-India-legislacion\\_0\\_671233230.html](https://www.eldiario.es/hojaderouter/tecnologia/coche_sin_conductor-autonomo-India-legislacion_0_671233230.html) [3 de septiembre de 2017].

- LIGIER Group (2018). "Industrial innovation and diversification for Ligier Group". Disponible en <http://www.ligiergroup.com/ligier-group/meet-the-ez10-the-driverless-shuttle.html> [6 de marzo de 2018].
- Li, L.; Huang, W. L.; Liu, Y.; Zheng, N. N. y Wang, F. Y. (2016). "Intelligence Testing for Autonomous Vehicles: A New Approach", en *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 1, núm. 2 pp. 158-166.
- Li, X.; Sun, Z.; Cao, D.; He, Z. y Zhu, Q. (2016). "Real-Time Trajectory Planning for Autonomous Urban Driving: Framework, Algorithms, and Verifications", en *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 21, núm 2, pp. 740-753.
- Meyer, G. M. (2015). "Roadmap\_Smart System for Automated Driving". Disponible en <http://www.smart-systems-integrations.org> [3 de septiembre de 2017].
- Okumura, B.; James, M. R.; Kanzawa, Y.; Derry, M.; Sakai, K.; Nishi, T. y Prokhorov, D. (2016). "Challenges in Perception and Decision Making for Intelligent Automotive Vehicles: A Case Study", en *IEEE Transactions On Intelligent Vehicles*, vol. 1, núm. 1, pp. 20-32.
- Rouse, M. (2017). "Smart city". Disponible en <http://internetofthingsagenda.techtarget.com> [2 de octubre de 2017].
- SAE International (2014). "Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems". Disponible en [http://standards.sae.org/j3016\\_201401](http://standards.sae.org/j3016_201401) [20 de agosto de 2017].
- Tesla (2017). "Tesla Autopilot". Disponible en <https://www.tesla.com/autopilot> [3 de septiembre de 2017].
- Wöhler, C. y Anlauf, J. K. (2001). "Real-time object recognition on image sequences with the adaptable time delay neural network algorithm-applications for autonomous vehicles", en *Image and Vision Computing*, vol. 19, núm. 9-10, pp. 593-618.
- Zakir, U. H. (2016). "Current Collision Mitigation Technologies for Advanced Driver Assistance Systems-A Survey", en *PERINTIS eJournal*, vol. 6, núm. 2, pp. 78-90.

# Actualidad de las redes vehiculares: vehículos eléctricos y red inteligente

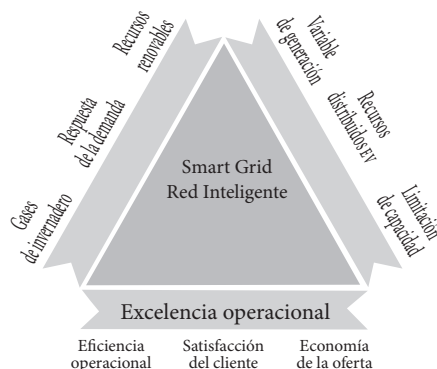
| NELY PATRICIA LÓPEZ MÁRQUEZ, LETICIA LEMUS CÁRDENAS,  
MÓNICA AGUILAR IGARTUA\*  
| UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA (UPC), BARCELONA, ESPAÑA

## INTRODUCCIÓN

La crisis energética y los problemas ambientales han alentado la adopción de vehículos eléctricos como una opción de transporte alternativo al vehículo convencional de combustión interna. Recientemente, el desarrollo del concepto de red inteligente en la red eléctrica ha avanzado en el campo de los vehículos eléctricos en forma de tecnología de vehículo a red. La tecnología de vehículo a red permite el intercambio de energía bidireccional entre vehículo eléctrico y red eléctrica, y ofrece numerosos servicios a la red eléctrica, como carga máxima, regulación y rotación de reserva de la energía eléctrica, nivelación de carga y consumo de potencia reactiva. Como la implementación de la tecnología de vehículo a red es un problema complejo de compromisos entre métricas con diferentes objetivos y limitaciones, generalmente se utilizan técnicas de optimización. Este capítulo recopila beneficios y desafíos de la tecnología de vehículo a red y también resume las principales técnicas de optimización encontradas en las últimas investigaciones realizadas en artículos elaborados por la comunidad científica para lograr diferentes objetivos de vehículo a red mientras se satisfacen múltiples restricciones (figura 1).

\* Correos electrónicos: nely.lopez@entel.upc.edu, leticia.lemus@entel.upc.edu, maguilar@entel.upc.edu

**Figura 1. Vehículos eléctricos en relación con las nuevas redes inteligentes emergentes (Rahbari *et al.*, 2017)**



## UN ESTUDIO SOBRE EL TRANSPORTE DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS DENTRO DEL SISTEMA DE RED INTELIGENTE

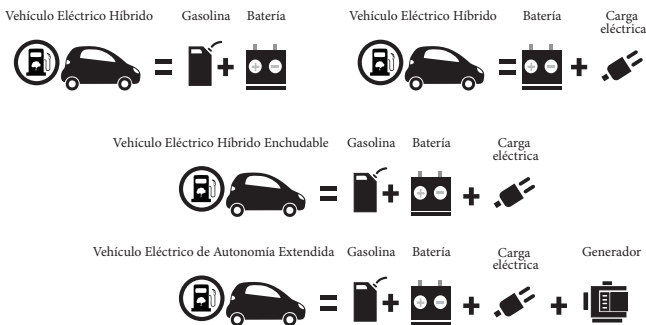
La electrificación del vehículo eléctrico híbrido reduce la dependencia del transporte de combustibles fósiles y reduce las emisiones de gases de efecto invernadero. Los beneficios económicos y ambientales de los vehículos eléctricos híbridos están remodelando en gran medida el sector del transporte moderno. La electrificación del transporte presenta varios desafíos para la SG (*Smart Grid/Red Inteligente*), como la calidad de la energía, la confiabilidad y el control. Por lo tanto, es necesario explorar y revelar las tecnologías habilitadoras clave para la electrificación del transporte. Además, la naturaleza intermitente de las RERS (*Renewable Energy Resources/Fuentes de Energía Renovable*) exige tecnologías de almacenamiento de energía distribuidas, eficientes, confiables, flexibles y dinámicas. La batería de almacenamiento de los EVs (*Electric Vehicles/Vehículos Eléctricos*) es la solución más prometedora para asentar la generación basada en las RERS dentro de la SG. La característica más eficiente del sector del transporte es el concepto de v2G (*Vehicle to Grid/Vehículo a Red*), que ayuda a almacenar el excedente de energía y a devolver esta energía a la red principal durante periodos de altas demandas. La tecnología de almacenamiento es una parte integral de la SG que ayuda a lograr la correcta utilización de las RERS. El objetivo es explorar el sector de las RERS y su impacto en la economía, la fiabilidad y el sistema ecológico, y revisar la tecnología v2G y los desafíos de su implementación. Se exploran tecnologías de almacenamiento

de energía implementadas en los EVs dentro de la SG, teniendo en cuenta su influencia en el medio ambiente y las necesidades de comunicación para los EVs; también se analizan los problemas y desafíos actuales de las tecnologías de almacenamiento de energía en los EVs y se consideran los beneficios técnicos y económicos de las tecnologías de almacenamiento. Por último, se explica brevemente el tema de las regulaciones, estándares y problemas de interfaz dentro de la SG. Entre las principales aportaciones de Shaukat *et al.* (2018), se encuentran las siguientes:

- 1) Análisis cualitativo de las tecnologías clave para la electrificación del transporte en escenarios SG, las tecnologías de EVs como: BEV (*Battery Electric Vehicle/Vehículo Eléctrico con Batería*), HEV (*Hybrid Electric Vehicle/Vehículo Eléctrico Híbrido*), PHEV (*Plug-In-Hybrid Electric Vehicle/Vehículo Eléctrico Híbrido Enchufable*) y EREV (*Extended Range-Electric Vehicle/Vehículo Eléctrico de Autonomía Extendida*). Los cuatro tipos de vehículos eléctricos se ilustran en la figura 2.

HEV es una combinación de batería y motor de combustión interna tradicional. La batería se utiliza para proporcionar energía para el motor eléctrico a una velocidad inferior a 64.37 km/h con cero emisiones. El motor de combustión conducirá al vehículo a velocidades más altas. PHEV es similar a HEV con la característica de volver a cargar conectándolo a una toma eléctrica. El aumento de la eficiencia del combustible y el mayor impacto favorable al medio ambiente son características distantes del PHEV, en comparación con el HEV. BEV es completamente operado por electricidad. La combinación de la batería y las caracterís-

**Figura 2. Tipos de vehículos eléctricos (Shaukat *et al.*, 2018)**



ticas de la recarga de toma de corriente eléctrica hacen que el BEV tenga cero emisiones. Los conductores deben tener cuidado con la recarga del BEV, ya que el reabastecimiento no es tan simple como acercarse a la estación de combustible más cercana. EREV es una combinación de BEV y PHEV con mayor eficiencia de combustible y emisiones reducidas.

- 2) Impactos de la electrificación en el transporte en la SG, tales como en la capacidad de carga de la SG, en la calidad de la energía, en la economía, y en el medio ambiente. El concepto v2G está elaborado para garantizar la característica más eficiente y atractiva del sector del transporte en la SG. Para gestionar la gran cantidad de EVs, existe una necesidad apremiante de introducir un agregador como intermediario entre la SG y el EV, donde el agregador proporciona un servicio auxiliar, ya que es una gran fuente de generación. Las interacciones de los EVs dentro de la SG proporcionan servicios adicionales, como control de voltaje, regulación de frecuencia, reserva de rotación y reserva no rotatoria. La sustitución del PEV en el transporte terrestre típico requiere un incremento de capacidad de generación de energía adicional, el cual repercute en el comportamiento de carga no controlada de los PEVs que sobrecargan la SG.
- 3) Taxonomía de los ESS (Energy Storage Systems/Sistemas de Almacenamiento de Energía) utilizados en las aplicaciones de alimentación de los EVs. Se toman en cuenta los desafíos, problemas y beneficios técnicos y económicos de las tecnologías de almacenamiento de energía empleadas en la SG. La interacción de las RERS con la SG requiere una atención especial en el control, monitoreo, gestión y diseño de la SG. Las RERS son altamente inciertas, dependen de las condiciones climáticas y suponen un gran desafío para la estabilidad de la SG y la fiabilidad de la misma. Los desafíos antes mencionados, sin embargo, pueden prevenirse utilizando medidas de compensación, como las tecnologías de almacenamiento de energía. La penetración masiva de las RERS y los EVs requieren ESS que brinden flexibilidad y generación de respaldo dentro de la SG. Además, los ESS ayudan a controlar la intermitencia de la RERS hasta un grado considerable y mejoran la eficiencia general de la SG. Los ESS presentan un vínculo crítico entre la demanda y la oferta de energía. La implementación de los ESS motiva las penetraciones de RERS en la SG. Los ESS son las tecnologías clave que se emplean para la operación confiable y eficiente de las RERS y la penetración de los EVs dentro de la SG. Los ESS interconectados con la SG son la mejor solu-

ción para controlar la intermitencia de las RERS, mejorar la calidad de la energía de la SG y gestionar la energía dentro de la SG.

- 4) La transición de la red eléctrica convencional necesita normas y estándares para gobernar la operación y el control sostenible de la SG. Las regulaciones actuales requeridas para el funcionamiento de la SG se describen brevemente. Los estándares SG que cubren tecnologías de sistemas de comunicaciones y de sistemas de potencia, de acuerdo con IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers/Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos*), NIST (*National Institute of Standards and Technology/Instituto Nacional de Estándares y Tecnología*) y IEC (*International Electrotechnical Commission/Comisión Electrotécnica Internacional*), se definen con base en el último estudio técnico.

El estándar IEEE P2030 cumple con los requisitos de interoperabilidad de la SG. Hace hincapié en el enfoque a nivel de sistema para los dispositivos de interoperabilidad del sistema de potencia, el de comunicación y las plataformas de tecnología de la información.

NIST controla el desarrollo de esfuerzos de estandarización, modelos y protocolos para proporcionar un servicio confiable y seguro para la SG. Según NIST, la SG debe garantizar mejoras en la resistencia a la interrupción, la calidad de la energía y la eficiencia de los sistemas de energía eléctrica, así como facilitar un mayor despliegue de energía renovable, autorreparación y mantenimiento predictivo en perturbaciones del sistema y reducción de emisiones de GHG (*Green House Gas/Gases de Efecto Invernadero*); todo ello, empleando electrificación en el transporte, transición a PHEVs y nuevas opciones de almacenamiento, así como oportunidades de mejora de la seguridad de la red.

IEC es una organización de desarrollo que se centra en los requisitos generales de la arquitectura de la SG. El grupo estratégico IEC SG se creó en 2008 para supervisar los esfuerzos de la SG en la industria eléctrica. Están definidos IEC 61000-4-30 para la calidad de la energía, IEC 61850 para las regulaciones del sistema de comunicación e IEC 14908-3 para la PLC (*Power Line Communication/Comunicación de Línea de Potencia*). La extensión IEC 61850-7-420 se usa para incorporar micro-red, y IEC 61968-9 es seguido por la implementación de la tecnología AMR (*Automated Meter Reading/Lectura Automática del Medidor*) y AMI (*Advanced Metering Infrastructure/Infraestructura de Medición Avanzada*) en la SG (Shaukat *et al.*, 2018).

## HACIA UNA CARGA EFICIENTE DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS MEDIANTE LA DIFUSIÓN DE INFORMACIÓN BASADA EN VANET

El diseño de un sistema de gestión de carga eficiente para EVs en movimiento se ha convertido en un problema de investigación emergente en futuras aplicaciones de vehículos conectados, dadas sus incertidumbres de movilidad. Los principales desafíos técnicos incluyen la inteligencia de toma de decisiones para la selección de CS (*Charging Stations/Estaciones de Carga*) y la infraestructura de comunicación correspondiente para la diseminación de información necesaria entre la red eléctrica y los EVs móviles. Cao y Wang (2017) proponen una solución que tiene como objetivo crear un gran impacto en la mejora de las experiencias de conducción de los usuarios finales (por ejemplo, minimizar el tiempo de espera de carga de los EVs durante sus viajes) y la eficiencia de carga en el lado de la red eléctrica. En particular, la decisión de selección de CS sobre dónde llevar a cabo la carga la realiza individualmente el EV para obtener beneficios de privacidad y escalabilidad. El *framework* de comunicación se basa en un paradigma de P/S (*Publish-Subscribe/Publicar-Suscribir*) para diseminar de manera eficiente la información de condición de la CS a los EVs que están en movimiento. Para eludir la rigidez de tener RSUs (*RoadSide Units/Unidades en el Camino*) estacionarias para la difusión de información, promueven el concepto de MaaS (*Mobility as a Service/Movilidad como Servicio*) explotando la movilidad de los vehículos de transporte público (por ejemplo, autobuses) para unir el flujo de información a los EVs, dados sus encuentros oportunistas. Analizaron varios factores que afectan la posibilidad de que los EVs accedan a información de las CS a través de comunicaciones oportunistas de v2v (*Vehicle to Vehicle/Vehículo a Vehículo*) y demuestran la ventaja de introducir autobuses en un sistema de gestión de carga común de los EVs en un escenario de la ciudad de Helsinki. Estudian la viabilidad y el beneficio de permitir que los EVs envíen sus reservas de carga para la lógica de selección de la CS, a través de autobuses que se encuentran de forma oportunista. Los resultados muestran que este sistema de gestión avanzada mejora tanto los rendimientos en los lados de la CS como del EV.

En el contexto de las nuevas tecnologías de comunicación, particularmente la quinta generación para transporte inteligente, se han propuesto nuevos mecanismos en entornos de vehículos conectados, incluyendo comunicaciones de v2I (*Vehicle to Infrastructure/Vehículo a Infraestructura*) y de v2V. Por un lado, los enfoques basados en v2I requieren costos para desplegar y mantener

infraestructuras estacionarias dedicadas y, a menudo, sufren de rigidez debido a la falta de flexibilidad de despliegue y posiblemente la reubicación de las instalaciones de RSU fijas. En comparación, la opción de comunicación v2v es una alternativa más flexible y eficiente, que respalda la necesaria diseminación de datos entre vehículos conectados cuando se encuentran.

Las VANETS (*Vehicular Ad hoc Networks/Redes Ad hoc* para Vehículos) son tecnología clave para aplicaciones de vehículos conectados, que van desde la seguridad vial y los sistemas de transporte inteligentes hasta el acceso a internet a bordo. Para la difusión de información, el paradigma de P/S es un paradigma de comunicación adecuado para crear aplicaciones en VANET con una naturaleza altamente elástica y escalable. Específico para las aplicaciones de carga de EV, el P/S también es aplicable donde cada CS actúa como un editor que publica su propia información de estado, incluyendo tiempo de cola, ubicación, precio de suministro y capacidad (es decir, velocidad de carga por unidad de energía), para EVs que actúan como suscriptores de la información.

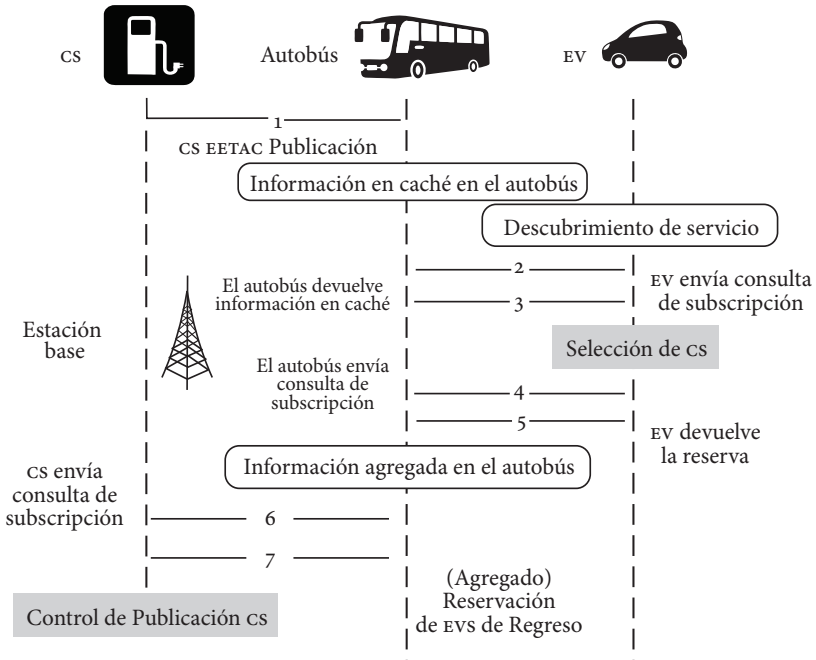
En este capítulo se presenta un *framework* móvil P/S basado en comunicaciones v2v para diseminar la información de condición de las CS a los EVs que están en movimiento para que tomen decisiones sobre la selección de CS. A diferencia de la práctica común como la de desplegar RSUs estacionarias, que es una estrategia muy rígida en el manejo de la movilidad de los EVs, se promueve el concepto de movilidad MaaS como esquema de explotación de la movilidad predecible de vehículos de transporte (de confianza), como son los autobuses públicos, para la retransmisión de mensajes en el *framework* P/S. La ventaja es que tales intermediarios móviles ofrecen encuentros oportunistas con EVs en cuanto a los requisitos de carga en la carretera; el despliegue de tales medios de comunicación en los autobuses puede tener en cuenta una amplia gama de información de contexto, como rutas de autobús preplanificadas, el número de autobuses en servicio y sus intervalos de tiempo de servicio.

En el *framework* de comunicación, el EV que ha hecho su selección de CS envía su reserva de carga, incluyendo cuándo arribará y cuánto tiempo previsto estará en la CS seleccionada. Además del flujo de información transmitido desde los CS a los EVs, esta reserva de carga se transmitirá a la CS seleccionada del EV, a través de un autobús que se encuentra de forma oportunista. Con estas reservas anticipadas de carga de EV implicadas, la CS computa y publica su EETAC (*Expected Earliest Time Available for Charging/Tiempo Previsto más Temprano Disponible para la Carga*) para extender la funcionalidad del autobús, para agregar las reservas de EV y luego informarlas al CS correspondiente.

En lugar de transmitir instantáneamente la reserva de cada EV a su CS seleccionada, la función de agregación propuesta tiene como objetivo reducir el costo de la comunicación del lado de la CS. Con las reservas anticipadas de EV, los planes de carga de los EVs se pueden gestionar de forma coordinada. Es decir, si una CS ha sido reservada por varios EVs para cargar, esa CS predice y publica su estado en un futuro cercano para otros EVs que necesitan servicios de carga para identificar el estado de congestión de las CS y, por lo tanto, seleccionar una CS alternativa para la carga. Aquí, la política de selección de CS (basada en el EETAC publicado desde la CS) es encontrar la CS en la que el EV (que necesita el servicio de carga) experimentaría el tiempo de espera de carga más corto. El procedimiento típico se encuentra en la figura 3.

Cao y Wang (2017) muestran que la frecuencia con la que las CS publican la información de su condición impulsa el rendimiento de la carga en términos de tiempo de espera de carga y el número de EV cargados. También se

**Figura 3. Descripción del framework de comunicación avanzada (Cao y Wang, 2017)**



muestra que la flexibilidad y movilidad de los autobuses ofrece un rendimiento de carga mejorado, en comparación con el caso de las RSU desplegadas. Un mayor esfuerzo en el control inteligente de la publicación de CS a través del conocimiento de las reservas de EVS muestra un rendimiento de carga mejorado. Mientras tanto, el beneficio de agregar reservas se refleja en el costo de comunicación reducido.

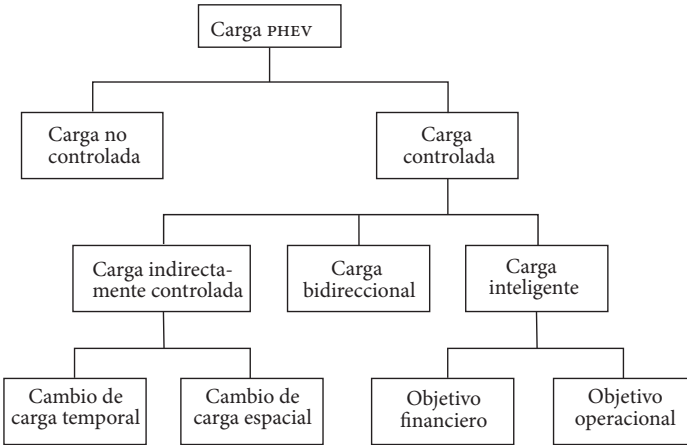
## GESTIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE CARGA DE BATERÍAS

### Esquemas de cobro para Vehículos Eléctricos Híbridos Enchufables en la Red Inteligente: un estudio

Los PHEVs (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*/Vehículos Eléctricos Híbridos Enchufables) se han convertido en una herramienta importante para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, debido a su menor dependencia de los combustibles fósiles. Dado que, por su rentabilidad, los PHEVs tienen una capacidad de batería limitada, deben recargarse con frecuencia y especialmente después de los viajes. Por lo tanto, la carga eficiente de la batería juega un papel importante en el éxito de la adopción comercial de los PHEVs. Los autores clasifican los esquemas de carga de baterías de los PHEVs existentes en cuatro clases: carga no controlada, indirectamente controlada, inteligente y bidireccional, y revisan varias técnicas existentes dentro de cada clase. La carga no controlada se centra en evaluar el impacto de agregar carga variable en la red inteligente. Para la carga indirectamente controlada, se propone controlar los precios de la energía con el fin de influir indirectamente en las operaciones de carga. La carga inteligente puede controlar directamente un amplio conjunto de parámetros de carga para lograr diversos objetivos de rendimiento, tales como minimizar la pérdida de potencia, maximizar los beneficios de los operadores y garantizar la equidad. La carga bidireccional, a su vez, permite a un PHEV descargar energía en la red inteligente, de modo que el vehículo puede actuar como una fuente de energía móvil para estabilizar aún más la red, que es parcialmente suministrada por fuentes de energía renovables intermitentes. Las últimas tres clases son colectivamente llamadas cargas controladas (Kong y Karagiannidis, 2016).

En la literatura, la carga no controlada y la controlada también se denominan no coordinada y coordinada, respectivamente. La coordinación se refiere

**Figura 4. Clasificación de esquemas de carga para PHEV (Kong y Karagiannidis, 2016)**



a la alineación de las instancias de carga y los parámetros entre los PHEVs. Por lo tanto, la carga no controlada no intenta organizar y programar las solicitudes de los PHEVs, sino que sirve a medida que llegan los PHEVs. Como tal, las baterías comienzan a cargarse inmediatamente al estar conectadas, en un escenario donde el operador de la red no cuenta con la información esencial para controlar los perfiles de carga, con el propósito de optimizar la estabilidad de la red inteligente, la eficiencia de la operación y la calidad de la energía.

Dependiendo de los tipos de parámetros de control, la carga controlada se clasifica además en indirectamente controlada, bidireccional e inteligente, como se ha mencionado anteriormente. En la carga controlada, el operador organiza los momentos y parámetros de carga para evitar que la red experimente una calidad de energía inaceptable y sufra desestabilización disruptiva, al mismo tiempo que satisface las demandas de carga del conductor. En la carga indirectamente controlada, los esquemas no controlan directamente los parámetros de carga, como la potencia del cargador, el tiempo de carga, la duración de carga, etcétera. En cambio, estos esquemas controlan algunos parámetros fuera del sistema, que afectarán indirectamente la operación de carga. Por ejemplo, un esquema puede controlar el precio de la energía que influirá en la decisión de carga de los conductores individuales para lograr el objetivo de evitar sobrecarga de red. A diferencia de la carga indirectamente controlada-

da, los esquemas de carga inteligente controlan directamente los parámetros de carga. Por ejemplo, algunos esquemas controlan la salida de las tomas eléctricas o el punto de consigna de los cargadores, de modo que la potencia puede variar de un lugar a otro, así como de vez en cuando.

En este caso, un PHEV no se debe cargar todo el tiempo cuando está enchufado, ya que no extrae energía de la red inteligente cuando la potencia de salida se establece en cero. Por lo tanto, la carga inteligente puede convertir efectivamente cada batería de PHEV en una carga flexible, que impondrá una demanda solo si al hacerlo no se corre el riesgo de interrumpir la red inteligente ni violar los requisitos de calidad de la energía, y satisface los objetivos de rendimiento financiero u operacional. Estos objetivos se pueden resumir de la siguiente manera (Kong y Karagiannidis, 2016):

- 1) Financiero: este tipo de objetivos apuntan a obtener retornos financieros directos. Por ejemplo, minimizar el costo del operador, minimizar las pérdidas de energía, maximizar el beneficio del operador, maximizar la utilización de la red eléctrica, etcétera.
- 2) Operacional: este tipo de objetivos resultan en una mejor eficiencia del sistema de energía. Por ejemplo, nivelar las curvas de carga en los transformadores de la subestación principal, evitar la sobrecarga térmica, lograr la equidad en las oportunidades de carga entre los PHEVs, etcétera.

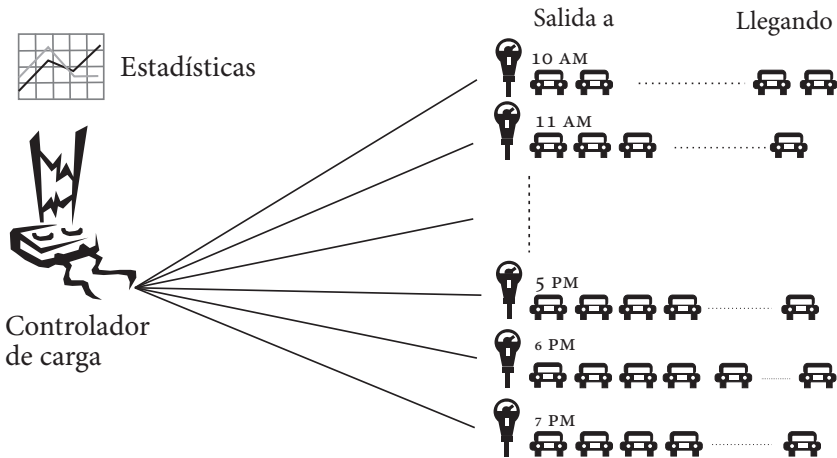
Los beneficios de la carga flexible se han aprovechado aún más en la carga bidireccional, que es lo mismo que la carga inteligente, excepto en un punto. Específicamente, la carga bidireccional admite el concepto de V2G, que permite a las baterías de los PHEVs descargar su energía en la red inteligente. En carga bidireccional, cada PHEV es tanto una carga flexible como una fuente de energía móvil, aunque no hay una diferencia obvia en otros aspectos, en comparación con la carga inteligente. Simplemente, con el flujo de potencia bidireccional, la batería del PHEV puede ayudar a estabilizar aún más la red inteligente al devolver energía para acortar la brecha de demanda cuando hay una carga excesiva de electricidad. La capacidad de devolver energía a la red también puede ayudar a soportar una integración de mayor escala de energía renovable en la red inteligente. Dado que las fuentes renovables son de naturaleza intermitente, la carga bidireccional permite que el PHEV se descargue para compensar la caída en el suministro de energía cuando la energía renovable no está disponible de repente (Kong y Karagiannidis, 2016).

### GESTIÓN ÓPTIMA DE LA CARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN APARCAMIENTOS MEDIANTE PROGRAMACIÓN DINÁMICA APROXIMADA DE DOS ETAPAS

Zhang y Li (2017) plantean un escenario de cobro para vehículos eléctricos enchufables en estacionamientos cerca de lugares comerciales donde la mayoría de los vehículos tienen tiempo de estacionamiento amplio. En comparación con los escenarios de carga nocturna para edificios residenciales, los estacionamientos de edificios comerciales durante el día tienen una llegada y salida significativa de vehículos estocástica o no determinista, así como un precio de electricidad altamente dinámico. En este artículo se propone un *framework* denominado en inglés TSADP (*Two-Stage Approximate Dynamic Programming / Programación Dinámica Aproximada de Dos Etapas*), para determinar la política óptima y estrategia de cobro para el tiempo actual, utilizando un modelo de pronóstico basado en datos a corto plazo (Optimización) y la estimación a largo plazo a partir de los datos históricos (Aproximación).

Los escenarios de simulación se crean modelando el comportamiento de llegada del vehículo como proceso de Poisson, incluidos la hora de llegada, la hora de salida y el estado de carga a la llegada. El precio altamente fluctuante

Figura 5. Escenario de llegada de vehículo de carga al estacionamiento (Zhang y Li, 2017)



conduce a una diferencia dramática en el costo total de carga para la estrategia de programación. Por lo tanto, el controlador de carga tiene como objetivo minimizar el costo total de la misma mientras se observa el límite de carga individual del vehículo y la capacidad de carga total del estacionamiento. Los resultados de la simulación muestran que el método propuesto puede disminuir significativamente el costo de la energía y que la política óptima es la que minimiza el costo combinando ambas etapas. Tal estrategia puede equilibrar las ventajas y desventajas de los esquemas a corto y a largo plazo (Zhang y Li, 2017).

### REQUISITO DE ROTACIÓN DE RESERVA CONSIDERANDO LA INTEGRACIÓN DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS ENCHUFABLES

Zhao *et al.* (2016) proponen un modelo novedoso llamado SRR, por sus siglas en inglés (*Spinning Reserve Requirement/Requisito de Rotación de Reserva*), que se define como la capacidad de reserva que está girando, sincronizada y preparada para equilibrar dinámicamente la carga del sistema, considerando la contribución de los PEVS (*Plug-in Electric Vehicles/Vehículos Eléctricos Enchufables*) en la provisión de una reserva operativa. Basado en los criterios probabilísticos, se formula el costo de la EESEV (*Expected Energy Supplied by PEVS/Energía Esperada Suministrada por los PEVS*). Los costos de las reservas de los generadores térmicos en los PEVS así como la EENS (*Expected Energy Not Supplied/Energía Esperada No Suministrada*) se consideran conjuntamente para determinar el SRR óptimo. El SRR óptimo se adquiere alcanzando la minimización del costo total a través del intercambio entre los costos de los generadores de la EENS y la EESEV. Se puede encontrar que un SRR grande da como resultado mayores costos de generadores y un SRR pequeño conduce a costos de EENS grandes. En general, el sistema con mayor demanda tendría mayor SRR y mayor costo del sistema; también se puede encontrar que el SRR se reduce considerablemente cuando se habilita el servicio V2G y el SRR es pequeño por la noche y grande durante el día bajo una estrategia de carga inteligente, en comparación con la estrategia de carga inmediata.

Las capacidades de la demanda de carga interrumpible del servicio PEV y V2G (*Vehicle to Grid/Vehículo a Red*) se calculan, respectivamente, bajo las condiciones de ambas estrategias de carga inmediata (los PEVS se cargan inmediatamente después de enchufarse a la red cuando los últimos viajes fina-

lizan en un día determinado, y la duración de carga depende del kilometraje del viaje durante el día) y de carga inteligente (se recopila información de viaje de cada PEV, como tiempo de viaje, consumo de energía de viaje diario; enseguida, el tiempo y la cantidad de demanda de carga del PEV se determinan ordenadamente para beneficiar la operación de los sistemas de potencia). Los resultados numéricos demuestran sistemáticamente la efectividad de la participación de los PEVS en la reducción de los costos de operación y la mejora de la confiabilidad del sistema de energía. En general, las principales contribuciones de este artículo (Zhao *et al.*, 2016) incluyen los siguientes aspectos:

- 1) Los PEVS se consideran en la determinación del SRR del sistema de potencia. Los costos de las reservas de generadores térmicos y el PEV, así como la EENS, se tienen en cuenta conjuntamente para determinar el SRR óptimo.
- 2) El concepto de la EESEV se propone para cuantificar la energía esperada suministrada por los PEVS. El tiempo de reacción de la provisión de reserva del PEV se tiene en cuenta en el cálculo de la EESEV, así como de la EENS.
- 3) La efectividad de los PEVS en la optimización del SRR del sistema de potencia, el compromiso de la unidad y la confiabilidad del sistema se investigan en cuatro escenarios posibles.
  - a) Si el SRR puede cubrir la pérdida de capacidad de la contingencia del sistema, no emerge el déficit de energía y no reaccionan los PEVS.
  - b) Si el déficit de energía es menor que la capacidad total interrumpible del PEV, solo se interrumpe parte de la energía de carga.
  - c) Si el déficit de energía es mayor que la capacidad interrumpible y menor que la capacidad total del PEV, se interrumpe la energía de carga total y se realiza parte del servicio V2G.
  - d) Si el déficit de energía es mayor que la capacidad total del PEV, la capacidad total de carga y la capacidad total de V2G están programadas para admitir el sistema de potencia. Solo en este caso, la energía no suministrada emerge.
- 4) El análisis de sensibilidad del nivel de penetración del PEV y la compensación a los propietarios de los PEVS se ejecuta para proporcionar una referencia significativa para la implementación futura de la participación de PEV en la reserva de operación.

## GESTIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE CARGA DE BATERÍAS EN LA RED INTELIGENTE

### Evaluación del Impacto del Vehículo Eléctrico en la Curva de Demanda de Potencia en un Entorno de Red Inteligente

Las redes inteligentes con una penetración intensiva de los recursos energéticos distribuidos tendrán un papel importante en los futuros escenarios del sistema de energía. La naturaleza intermitente de las fuentes de energía renovables trae nuevos desafíos, que requieren una gestión eficiente. Se pueden utilizar recursos de almacenamiento adicionales para abordar este problema: el uso masivo de EVs (*Electric Vehicles/Vehículos Eléctricos*), particularmente V2G (*Vehicle to Grid/Vehículo a Red*), se convierte en un problema muy relevante. Esta sección aborda el impacto de los EVs en los costos de operación del sistema y la curva de demanda de energía para una red de distribución con gran penetración de unidades de DG (*Distributed Generation/Generación Distribuida*). Se propone una metodología de gestión eficiente para la carga y descarga de los EVs, considerando un problema de optimización de objetivos múltiples. Los objetivos principales de la metodología propuesta (Morais *et al.*, 2014) son:

- 1) Intenta minimizar el costo de operación de los recursos energéticos disponibles, es decir, el uso de DG y de EV. En el costo de operación, también se considera la adquisición de energía a proveedores externos y las penalidades con la demanda no suplida (energía requerida por los consumidores pero no suministrada) y con los contratos de «tomar o pagar» (disposición escrita por contrato, mediante el cual el operador del sistema tiene la obligación de tomar energía generada o pagar una cantidad específica).
- 2) Trata de optimizar el factor de carga (igual a 1), es decir, intenta minimizar las diferencias entre el máximo y la demanda de potencia promedio de una red de distribución considerando un día como el horizonte de tiempo.

El uso de los valores de demanda máximo y promedio en la función objetivo convierte la función en una función convexa, aumentando la complejidad

para obtener el problema global óptimo. Las restricciones consideradas incluyen las restricciones de generación distribuida técnica y las restricciones de los EVs.

El primer objetivo, que consiste en la minimización del costo de operación, es operar los recursos energéticos distribuidos al menor costo posible. Los costos de los recursos energéticos están representados por una función de costo lineal. Los EVs se ven como otro recurso de energía distribuida para el operador del sistema, lo que requiere la inclusión de los costos con la descarga y la carga. El operador del sistema tendrá que pagar la energía descargada del EV, y cuando los usuarios del EV necesiten cargar sus vehículos, el operador del sistema recibirá un pago por el suministro de la cantidad de energía requerida. Para utilizar el concepto de V2G de manera sostenible, las tarifas de remuneración aplicadas a las baterías de vehículos eléctricos que suministran energía a la red deben planificarse cuidadosamente y deben estar muy por encima del costo de degradación de las baterías. La inclusión de la demanda no suplida y de los costos reducidos de generación de energía tiene como objetivo presentar una formulación matemática robusta, que se ocupa de situaciones críticas en la red eléctrica gestionada por los agregadores. La demanda no suplida se activa cuando el suministro no es suficiente para equilibrar la demanda de la carga, y los consumidores recibirán un pago por la potencia de demanda no suplida. La generación de energía acortada es importante para los contratos de «tomar o pagar» que el operador del sistema establece con algunas unidades DG (por ejemplo, unidades fotovoltaicas). En estas situaciones, cuando la carga es inferior a esta generación, el valor de la generación de energía reducida será la diferencia entre ambos (Morais *et al.*, 2014).

El segundo objetivo consiste en la optimización de la curva de demanda de potencia, tratando de poner el factor de carga en 1. El factor de carga se obtiene considerando el consumo total de energía y el pico de demanda teniendo en cuenta un horizonte temporal específico. En la presente metodología, el horizonte temporal es de un día (24 periodos de una hora). El uso de vehículos eléctricos y otros sistemas de almacenamiento puede equilibrar la curva de demanda de potencia, cargar energía en horas de menor actividad y descargar en horas pico. La demanda de energía constante hace que el sistema sea más predecible y fácil de administrar, y el costo de la energía es más regular durante el día. La metodología propuesta intenta minimizar la diferencia entre el promedio y la demanda máxima de potencia. Sin embargo, es importante que la inclusión de la demanda no suplida y de la generación de energía reduzca los

costos en la función objetivo para penalizar su uso, evitando la reducción de todas las cargas (Morais *et al.*, 2014).

Se presentan dos perspectivas de la gestión eficiente de estos recursos, teniendo en cuenta la cantidad de EVs que se pueden conectar a una red de distribución específica. La carga y descarga de los EVs se gestionan conjuntamente con otros recursos disponibles, considerando dos objetivos diferentes. Estos incluyen la minimización de los costos de operación y la optimización de la curva de demanda de energía. El planteamiento muestra que una gestión eficiente de redes inteligentes futuras con uso masivo del EV requiere realizar optimizaciones adecuadas, considerando varias funciones objetivas y teniendo en cuenta todas las restricciones técnicas relevantes. Los resultados muestran que la solución óptima de las funciones objetivas consideradas no se puede obtener simultáneamente. Otro punto importante es que la gestión de la carga del EV es incluso más importante que la gestión de la descarga del EV, con el fin de mejorar el factor de carga sin aumentar significativamente los costos de operación (Morais *et al.*, 2014).

#### GESTIÓN DEL RIESGO Y PLANIFICACIÓN DE LA PARTICIPACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN REDES INTELIGENTES PARA LA RESPUESTA A LA DEMANDA

DR (*Demand Response*/Respuesta de la Demanda) puede servir como una herramienta efectiva para equilibrar mejor la demanda y el suministro de electricidad en la red inteligente. Se define como «los cambios en el uso de electricidad por parte de los usuarios finales de sus patrones de consumo normales» en respuesta a los pagos de fijación de precios e incentivos. Este artículo se centra en nuevas oportunidades para DR con EVs (*Electric Vehicles*/Vehículos Eléctricos). Los EVs son recursos potenciales de energía distribuida que admiten los modos de G2V (*Grid to Vehicle*/Red a Vehículo) y V2G (*Vehicle to Grid*/Vehículo a Red). Su participación en los programas DR basados en tiempo (por ejemplo, tiempo de uso) y basados en incentivos (por ejemplo, servicios de regulación) ayudan a mejorar la estabilidad y reducir los riesgos potenciales para la red. La programación inteligente de las actividades de carga y descarga de los EVs también admite una alta penetración de energías renovables con generación de energía volátil. Este artículo propone un modelo estocástico desde la perspectiva del ISO (*Independent System*

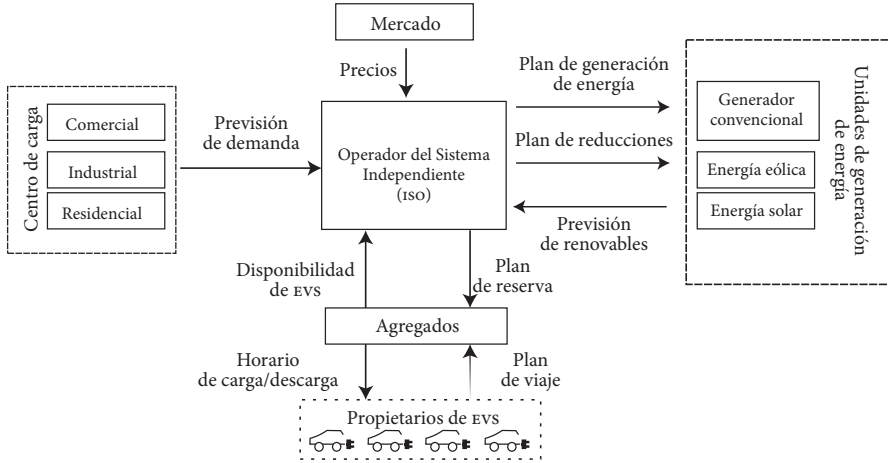
*Operator/Operador del Sistema Independiente*) para la gestión del riesgo y la planificación de la participación de los EVs en la red inteligente para DR. Los factores de riesgo considerados en este artículo incluyen aquellos causados por incertidumbres en energías renovables (eólica y solar), patrones de carga, patrones de estacionamiento y confiabilidad de líneas de transmisión. Se ha investigado la efectividad del modelo en respuesta a diversos entornos, como el tipo (residencial, comercial e industrial), el nivel de penetración de los EVs y el nivel de riesgo. Por tanto, en Nezamoddini y Wang (2016) se propone lo siguiente:

- 1) Un modelo estocástico para la participación de EV, tanto en programas DR basados en tiempo como en incentivos, considerando las interacciones entre ISO y los agregadores. Para la DR basada en tiempo, se enfoca en el TOU (*Time Of Use/Tiempo de Uso*); para la DR basada en incentivos, se enfoca en los servicios de regulación.
- 2) Los factores de riesgo considerados en el artículo incluyen aquellos causados por incertidumbres en energías renovables (eólica y solar), patrones de carga, patrones de estacionamiento y confiabilidad de líneas de transmisión.
- 3) Se investiga la efectividad del modelo en respuesta a diversos entornos, como el tipo de área (residencial, comercial e industrial), el nivel de penetración de EV y el nivel de riesgo.
- 4) Se resalta la necesidad de un mecanismo de planificación inteligente que no solo optimice la carga del EV, sino que también respalde la respuesta a la demanda de estabilización de la red y los servicios auxiliares.

La descripción general del sistema se muestra en la figura 6.

El ISO juega un papel central en el sistema, opera el mercado recogiendo y emitiendo información entre varios actores del mercado, como las unidades de generación de energía, los centros de carga y los agregadores del EV. El ISO intenta minimizar los costos de operación del sistema mientras mantiene el equilibrio entre la oferta y la demanda en todo momento. El sistema de energía consiste en unidades de generación de energía distribuida, como generadores de energía convencionales, así como sistemas de energía renovable eólica y solar. Debido a la capacidad limitada de cada batería del EV, la contribución aislada de un EV individual a la red es insignificante. En la literatura existente, la planificación de la participación de los consumidores pequeños en el mercado mayorista de electricidad es ineficiente. Sin embargo, las actividades de carga

**Figura 6. Descripción general del sistema examinado en el artículo (Nezamoddini y Wang, 2016)**



y descarga controladas de una gran cantidad de EV a través de un servicio de agregación pueden ser una forma efectiva de lograr los objetivos de DR deseados. Por lo tanto, la entidad intermedia, como el agregador, debe participar en las licitaciones y coordinar las actividades de carga y descarga de EV. Los agregadores admiten los modos G2V y V2G. Para permitir a los agregadores programar EV de forma adecuada, los propietarios de EV informan la capacidad de la batería y los planes de viaje con la hora prevista de llegada y salida (Nezamoddini y Wang, 2016).

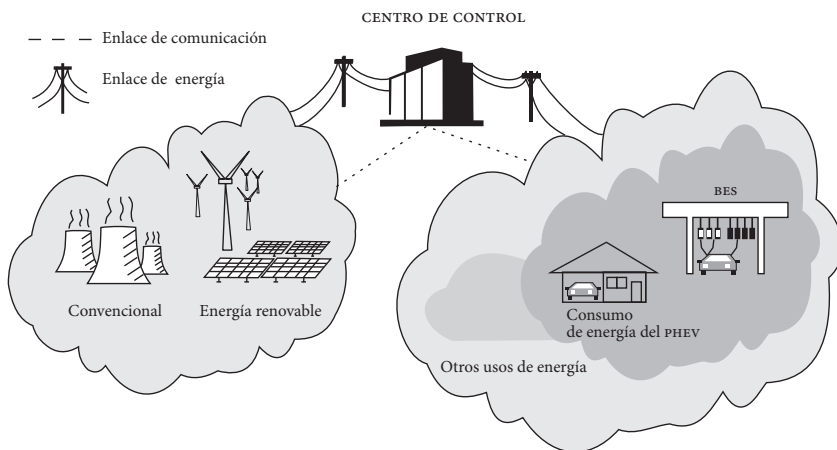
### ESQUEMAS DE PROGRAMACIÓN DE CARGA DE INCENTIVOS PARA ESTACIONES DE INTERCAMBIO DE BATERÍA PARA PHEV EN LA RED INTELIGENTE

En esta sección se estudian los esquemas de programación de cargas para PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*/Vehículos Eléctricos Híbridos Enchufables) y BESS (*Battery Exchange Stations*/Estaciones de Intercambio de Batería) en la red inteligente. Dado que cada BES almacena una cantidad relativamente grande de baterías, puede contribuir de manera significativa al sistema DSM (*Demand-Side Management*/Gestión de la Demanda) en la red inteligente al

volver a vender la electricidad a la red durante las horas pico. Al hacerlo, la relación PAR (*Peak-to-Average Ratio*/Radio Promedio de la Carga Máxima) de la red se puede reducir aún más en el sistema DSM existente para otras aplicaciones. Para lograr eso, Ye *et al.* (2017) proponen varios esquemas de programación de carga para BESS, entre los cuales se describen los siguientes:

- 1) Introducen las BESS en el sistema de DSM para que el almacenamiento de energía de los PHEV se pueda aplicar uniformemente a fin de suavizar aún más la carga de la red eléctrica; se propone establecer las BESS análogas a las estaciones de servicio si los PHEVs tienen baterías estandarizadas. Si las BES venden electricidad a la red durante las horas pico y cargan las baterías fuera de las horas pico, la carga de la red puede suavizarse. Por lo tanto, el enfoque del sistema de la DSM propuesto está en las BES en lugar de los PHEVs individuales.
- 2) Proponen dos esquemas de programación de cobro óptimos centralizados para lograr un PAR mínimo, seguido de un esquema de incentivos para que las BESS estén motivadas para participar.
  - a) Permiten que el centro de control se haga cargo de la programación de carga de todas las BESS y estén sujetas a lograr un PAR mínimo mientras satisface a todos los clientes.
  - b) Proponen un esquema de programación de carga de incentivos para las BESS, es decir, que obtengan ganancias vendiendo energía a la

**Figura 7. Sistema de gestión de la demanda de energía (Ye *et al.*, 2017)**



- red durante las horas pico y carguen las baterías durante las horas de menor actividad, de igual manera se logra un PAR mínimo.
- 3) Proponen un esquema de juego teórico para que la programación de carga para cada BES pueda participar localmente, entre cada BES, en un intercambio de información limitado en el sistema de DSM, sin entregar el control al centro de control. En este enfoque, cada BES tiende a maximizar su propio beneficio en lugar de maximizar las ganancias totales de todas las BESS. A diferencia de los dos primeros esquemas, este no garantiza el 100 % de satisfacción del cliente, ya que cada BESS carece de información precisa de las demás.

Las BESS contribuyen al sistema de DSM y suavizan aún más la carga de la red eléctrica, aunque la carga total se incrementa debido a la gran cantidad de PHEVs. Analizan el impacto de la cantidad total de almacenamiento de la batería en las BESS en PAR. También analizan el impacto del número de puertos de carga en cada BESS en cuanto a la cantidad total de almacenamiento de batería y PAR. El esquema teórico del juego propuesto puede reducir PAR en términos prácticos (Ye *et al.*, 2017).

### CARGA INTELIGENTE: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA PARA LA INTERACCIÓN ENTRE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS ENCHUFABLES Y LA RED ELÉCTRICA

Los últimos años han sido testigos del aumento constante de las ventas de PEV (*Plug-in Electric Vehicle/Vehículos Eléctricos Enchufables*). Las estrictas regulaciones gubernamentales junto con la presión constante de los grupos ecologistas aumentarán aún más la demanda y las ventas de dichos vehículos. Esta tendencia podría ejercer presión sobre la red, los circuitos y transformadores locales de distribución de energía. Un aumento repentino en el consumo de energía, causado principalmente por personas que cargan sus vehículos al mismo tiempo y durante la carga máxima de la utilidad, puede ocasionar problemas. Estos problemas son causados principalmente por la gran demanda en los transformadores de tensión locales y las fuentes de energía. Las empresas de generación y distribución de energía pueden tener que incurrir en importantes aumentos de costos si este problema no se maneja adecuadamente. Abousleimn y Scholer (2015) presentan un diseño y una lógica de implementación para un sistema de red inteligente que permite la interacción dinámica entre

electricidad/PEV y la red eléctrica. Esta interacción inteligente y dinámica permitirá una carga segura y semiestable en la red y, por lo tanto, minimizará el costo y evitará el daño causado por las cargas excesivas.

El diseño del sistema y la implementación de la OC (*Optimized Charging/Carga Optimizada*) son también conocidos como carga inteligente. La OC intenta evitar un problema que podría volverse crítico a medida que aumenta el número de los PEVS. Implementar una interacción de sistema inteligente entre la red y el PEV es la solución más viable y más barata para el repentino aumento en la demanda eléctrica. La OC funciona de la siguiente manera: el conductor regresa a su casa del trabajo alrededor de las 17 y 18 horas (este tiempo suele ser la hora pico para la demanda de la red eléctrica). El conductor generalmente conecta el PEV a la red cuando llega a casa. Si el PEV es tratado como un electrodoméstico normal, y si unos cuantos usuarios más dentro del mismo vecindario conectan su PEV a la red probablemente dentro del mismo rango de tiempo, esto impondrá cargas significativas en la red. Esta carga puede ser más de lo que pueden manejar los transformadores locales o la empresa eléctrica. Tales cargas adicionales pueden causar apagones, ya que los circuitos de distribución pueden sobrecargarse o los transformadores locales se sobrecargarán y fallarán. La OC manejará este problema permitiendo que el PEV se comunique con la utilidad. Esta comunicación garantizará una distribución de energía segura y estable e incluirá una interfaz amigable para el cliente. Desde una perspectiva general del sistema, la OC se ocupa de los siguientes pasos (Abousleimn y Scholer, 2015):

- 1) Interfaz del cliente con el PEV. El cliente o la interfaz del controlador con el PEV se preocupan principalmente por conectar el PEV a la red en cualquier momento del día. Sin ninguna implementación de la OC, el PEV debería comenzar a cargarse a la potencia nominal que el OBCM (*On-Board Charger Module/Módulo de Carga de a Bordo*) pueda manejar a una tasa especificada por los controladores en el vehículo. Cuando se implementa la OC, el PEV no comienza a cargar de inmediato. El cliente debe ir a una página web de internet y seleccionar la mejor opción disponible para él. Después de que el vehículo está enchufado, el cliente selecciona el SoC objetivo (*State of Charge/Estado de Carga*) y las horas de inicio/finalización del evento de carga dentro de las próximas 24 h. El cliente luego hace clic en el botón calcular. Se muestran el costo, la hora de inicio, la hora de finalización y el SoC final para las tres opciones disponibles y que el cliente seleccione: más rápida, más barata

y optimizada. La opción más rápida significa que el vehículo comenzará a cargar inmediatamente a máxima potencia sin tener en cuenta el costo de la electricidad o las cargas de servicios públicos. La opción más barata le dará al cliente la opción de cargar durante el menor costo de tiempo posible. Esto significa que la carga podría no iniciarse de inmediato, sino que podría comenzar en un momento posterior, cuando el precio de la electricidad sea menor. La opción optimizada equilibra la carga al comunicarse con la red para proveer el tiempo de carga más económico y, al mismo tiempo, estar limitado por el consumo de energía total permitido del vehículo según lo provisto por la compañía eléctrica. Esta opción también significa que es posible que la carga no comience de inmediato, sino en un momento diferente, considerando el costo de la electricidad y los límites de potencia establecidos por la empresa de energía eléctrica.

- 2) Interfaz PEV con la red. El PEV interactúa con la red para permitir que los datos que la red está enviando se utilicen en el cálculo de la información antes de que el PEV pueda transmitirla a la página web. La empresa

**Figura 8. Ejemplo de la interfaz del cliente con el PEV**  
(Abousleimn y Scholer, 2015)

The screenshot displays a user interface for a PEV charging station. At the top, there is a header bar with a vehicle image on the left and a status box on the right containing: Location: Yuma, AZ; Vehicle Status: Plugged In; Last Updated: 12/19/2011 5:08:21 PM; and Time Zone: MT.

**Step 1. Select vehicle charge parameters**

This section includes a 'Selected SOC' slider set to 50%. To the right are input fields for 'Start Date' (05/05/2013), 'Start Time' (09:00 PM), 'End Date' (05/05/2013), and 'End Time' (11:30 PM). There are 'Calculate' and 'Reset Form' buttons.

**Step 2. Estimated vehicle response**

This section shows three options for charging:

- Fastest (Not Optimized):** Cost: \$2.35, Start: 4/18/13 9:58 AM, End Time: 4/18/13 10:31 AM, Est SOC: 95%
- Cheapest (Price Based):** Cost: \$1.25, Start: 4/18/13 9:58 AM, End Time: 4/18/13 11:05 AM, Est SOC: 75%
- Optimized (\$ + DR Based):** Cost: \$1.75, Start: 4/18/13 9:58 AM, End Time: 4/18/13 10:48 AM, Est SOC: 98%

**Step 3. Select smart charge method**

This section has three radio buttons: 'Fastest', 'Cheapest', and 'Optimized'. The 'Optimized' option is selected. There are 'Send To Vehicle' and 'Cancel' buttons.

de energía eléctrica envía datos al vehículo, los cuales se envían siempre que este está enchufado. Estos datos incluyen dos matrices. Una matriz representa el precio de la electricidad para las próximas 24 h y la otra representa el DRLC (*Demand Response Load Control/Control de Carga de Respuesta a la Demanda*), esto es, el porcentaje de carga que el vehículo puede consumir en las próximas 24 h. Para el sistema desarrollado, la longitud total de las matrices se seleccionó para ser 96 elementos. Esto significa que los datos cubren intervalos de 15 minutos durante las próximas 24 h. Cada hora tiene cuatro intervalos de 15 minutos ( $4 \times 24 = 96$ ).

Abousleimn y Scholer (2015) proponen un sistema que describe cómo se implementa la carga inteligente. El diseño completo del sistema de *hardware* se presenta con énfasis en los algoritmos desarrollados para calcular el costo, los tiempos de carga y el SoC final para las opciones más económicas, rápidas y optimizadas. El sistema fue desarrollado, implementado y probado en el Departamento de Energía de Estados Unidos. El sistema se probó en varios escenarios y demostró ser rápido y eficiente y que puede ser utilizado con éxito para aliviar la carga en la red eléctrica.

## MODOS DE OPERACIÓN PARA EL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN REDES INTELIGENTES Y HOGARES INTELIGENTES: MODOS PRESENTES Y PROPUESTOS

Monteiro *et al.* (2016) presentan los principales modos de operación para un cargador de batería del EV (*Electric Vehicle/Vehículo Eléctrico*) enmarcado en redes inteligentes y hogares inteligentes, es decir, proponen modos de operación que pueden representar un bien hacia la adopción del EV. Además de los conocidos modos de operación G2V (*Grid to Vehicle/Red a Vehículo*) y V2G (*Vehicle to Grid/Vehículo a Red*), este artículo propone dos modos de operación: H2V (*Home to Vehicle/Casa a Vehículo*), donde la corriente del cargador de batería EV es controlado según el consumo de corriente de los electrodomésticos del hogar (este modo de operación se combina con G2V y V2G) y V4G (*Vehicle for Grid/Vehículo para Red*), donde el cargador de batería EV se usa para compensar armónicos de corriente o potencia reactiva, simultáneamente con los modos de operación G2V y V2G. El modo de operación de V2H (*Vehicle to Home/Vehículo a Casa*), donde el EV puede operar como fuente de alimenta-

ción en sistemas aislados o como fuente de alimentación ininterrumpida fuera de línea para alimentar los electrodomésticos prioritarios de la casa durante cortes de energía de la red eléctrica. Estos cinco modos de operación (G2V, V2G, H2V, V4G y V2H) fueron validados a través de resultados experimentales utilizando un prototipo de cargador de batería EV bidireccional de 3.6 kW desarrollado, que fue especialmente diseñado para estos modos de operación.

Las estrategias de control de corriente y voltaje para ambos convertidores AC-DC (*Front-End Converter/Convertidor Frente-Fin*) y DC-DC (*Back-End Converter/Convertidor Detrás-Fin*) se analizan en Monteiro *et al.* (2016). El control digital se implementa en un procesador de señal digital de Texas Instruments. Para obtener referencias sinusoidales a la corriente de la red (o al voltaje durante el modo de operación V2H), se utiliza un algoritmo PLL (*Phase-Locked Loop/Bucle de Fase Cerrado*), el cual proporciona dos señales unitarias en fase y en cuadratura con el voltaje fundamental de la red eléctrica.

Teniendo en cuenta que el convertidor de AC-DC es un convertidor de fuente de voltaje, cuando se controla en modo de voltaje, el control de la tensión de salida se realiza directamente ajustando el valor del ciclo de trabajo del modulador PWM (*Pulse Width Modulation/Modulación por Ancho de Pulsos*). Por lo tanto, la referencia de voltaje se compara directamente con una portadora triangular para obtener los patrones de impulsos de puerta o entrada.

El convertidor DC-DC se usa para cargar las baterías en dos etapas. En la primera etapa, las baterías se cargan con corriente constante (aproximadamente 80 % de la capacidad de la batería), y en la segunda etapa, las baterías se cargan con un voltaje constante (aproximadamente 20 % de la capacidad de la batería). La corriente para cargar las baterías está controlada por el convertidor DC-DC que funciona como un convertidor de tipo carga.

Durante el modo de operación H2V, la corriente en el EV se controla de acuerdo con el consumo actual de los electrodomésticos en el hogar, con el objetivo de prevenir sobrecargas y disparos de sobrecorriente en el interruptor de circuito principal de la casa. Este modo de operación se realiza durante el proceso de carga o descarga de la batería EV.

Durante el modo de operación V4G, el cargador de batería EV se usa para compensar la potencia reactiva o los armónicos de corriente en el hogar. Este modo de operación también se puede realizar durante el proceso de carga o descarga de la batería EV. Durante el modo de operación V2H, el EV se usa para operar como una fuente de alimentación para un hogar aislado o como UPS (*Uninterruptible Power Supply/Fuente de Poder Ininterrumpible*) fuera de línea para un hogar conectado a la red.



## DISEÑO Y DESARROLLO DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL INTELIGENTE PARA VEHÍCULOS HÍBRIDOS ENCHUFABLES, INCLUIDA LA FUNCIONALIDAD DE VEHÍCULO A CASA

Los PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*/Vehículos Eléctricos Híbridos Enchufables) se consideran un paso adelante en la electrificación del transporte para reemplazar los vehículos convencionales ICE (*Internal Combustion Engine*/Motor de Combustión Interna). Sin embargo, para considerar las capacidades de V2H (*Vehicle to Home*/Vehículo a Casa) y de H2V (*Home to Vehicle*/Casa a Vehículo) se debe desarrollar una nueva estrategia de control de energía para evitar un nuevo consumo de picos. Aghajani y Kalantar (2017) presentan un controlador basado en lógica difusa, que integra un objetivo SoC (*State of Charge*/Estado de Carga) para la aplicación V2H. La capacidad V2H se usa cuando el PHEV está conectado a la casa para ayudar a la red a cumplir con las cargas domésticas durante el periodo pico. El objetivo del SoC es el mínimo SoC que el PHEV debe tener cuando el conductor conecta el PHEV a la casa. El concepto de V2H y H2V aumenta los beneficios de usar PHEV/EV en un entorno de microrred inteligente (Berthold *et al.*, 2015).

En este sistema, la casa está conectada a la red y a N número de fuentes de energía renovable. En la figura 10, las fuentes de energía renovables están representadas por energía solar y eólica. Sin embargo, se pueden agregar más fuentes de energía renovables. Cuando el PHEV está conectado a la casa, la batería puede cargarse desde fuentes de energía renovables a la red o a ambas. Este flujo de energía es denominado H2V. La batería también puede ayudar a la red a cumplir con las cargas domésticas. Este flujo de energía se denomina V2H. Cuando el PHEV se desconecta de la casa, el vehículo es propulsado por la batería, el motor o ambos. Para cumplir estas funciones, se implementan dos controladores para administrar los flujos de energía, como se muestran en la figura 11.

Un primer controlador, llamado controlador doméstico, se enciende cuando el vehículo está conectado a la casa y luego se enciende un segundo controlador, llamado controlador PHEV, cuando se usa el vehículo. El objetivo del controlador doméstico es administrar la energía restante de la batería para ayudar a que la red suministre la carga doméstica durante el periodo de encendido-pico y carga de la batería en el periodo de apagado-pico. El efecto de utilizar periodos pico de encendido/apagado es cambiar la carga de la batería de los periodos pico a la noche y también reducir los picos utilizando la energía restante de la batería. Por lo tanto, el precio de la electricidad indicará cuándo

Figura 10. Diagrama de la microrred (Berthold *et al.*, 2015)

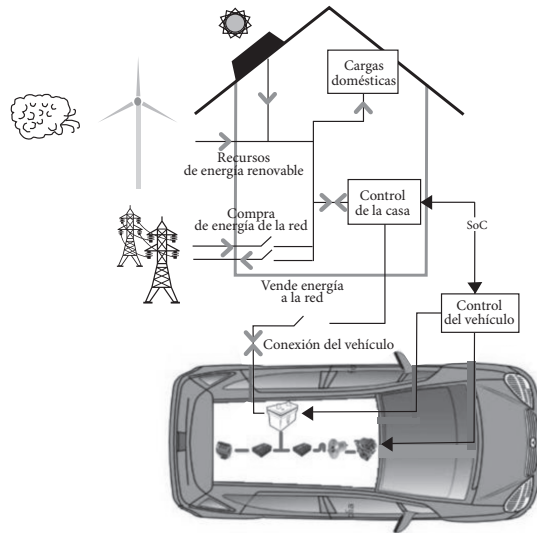
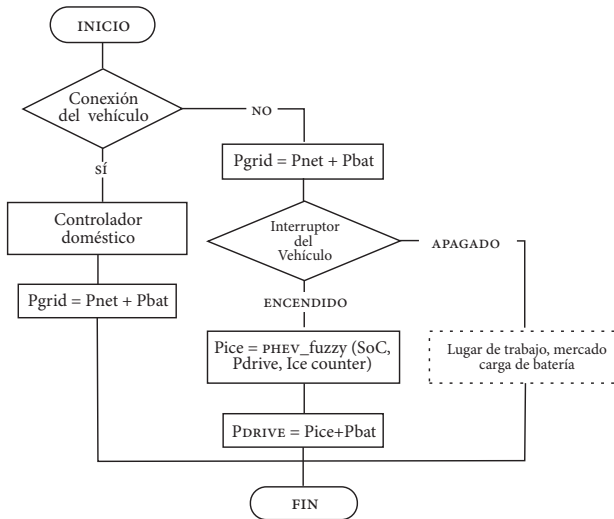
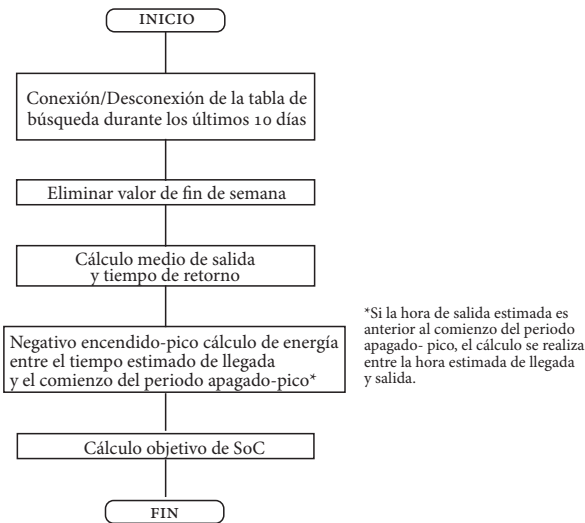


Figura 11. Control global de la microrred (Berthold *et al.*, 2015)



**Figura 12. Algoritmo objetivo SoC (Berthold *et al.*, 2015)**



se producen picos de apagado-encendido. Entonces, el controlador doméstico puede usar un precio de electricidad predeterminado.

El objetivo de SoC es parametrizar el controlador PHEV. Al final del ciclo de manejo, el SoC de la batería debe estar al menos en el valor objetivo de SoC dentro de una ventana de  $\pm 5\%$ . La figura 12 presenta el algoritmo utilizado para calcular este SoC (Berthold *et al.*, 2015).

El controlador doméstico registra los últimos 10 días de consumo y producción de energía y la hora de salida y llegada del PHEV. Los 10 días incluyen al menos cinco días hábiles consecutivos para poder tener una duplicación del hábito del conductor. Este estudio supone que el PHEV está conectado a la microrred cuando el vehículo llega a casa. Además, si el PHEV se conecta/desconecta más de una vez al día, el controlador solo registra la primera desconexión y la última conexión porque son las más importantes. Para calcular el objetivo del SoC, el controlador debe considerar estos dos valores cuando el vehículo está conectado por la noche y cuando se desconecta por la mañana; lo que sucede en el día no se considera para el cálculo del SoC. El SoC se calcula de acuerdo con las cargas domésticas y la producción de energía local. Luego, al final de todos los ciclos de manejo, el SoC debe estar hasta la parte inferior de la ventana del SoC para poder ayudar a la red a cumplir con las cargas domésticas durante el periodo pico de encendido. En un trabajo futuro

se puede implementar una estrategia más avanzada de control de energía en el hogar para tener un mejor efecto en el suavizado máximo. Además, se debe diseñar una configuración experimental para validar la estrategia de control y compararla con una estrategia de control fuera de línea (Berthold *et al.*, 2015).

#### PROGRAMACIÓN ÓPTIMA DESCENTRALIZADA PARA LA CARGA Y DESCARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS ENCHUFABLES EN REDES INTELIGENTES

Xing *et al.* (2016) se centran en la adquisición del servicio de cambio de carga mediante la programación óptima de la carga y descarga de PEVS (*Plug-in Electric Vehicle/Vehículos Eléctricos Enchufables*) de forma descentralizada. Los autores asumen el flujo de energía entre los PEVS y la red bidireccional, es decir, los PEVS también pueden liberar energía de vuelta a la red como generación distribuida, que se conoce como V2G (*Vehicle to Grid/Vehículo a Red*). El problema de programación óptima se formula luego como un problema de MDP (*Mixed Discrete Programming/Programación Discreta Mixta*); se propone una aproximación solucionable del problema MDP explotando la característica de forma de la curva de demanda de base durante la noche y se desarrolla un algoritmo descentralizado, basado en el relleno de agua iterativo. Su algoritmo está descentralizado en el sentido de que los PEVS calculan localmente y se comunican con un agregador. La ventaja de su algoritmo es que incluye la reducción de la carga computacional y la preservación de la privacidad.

Motivados por la popularidad de los PEVS en un futuro muy cercano, los autores Xing *et al.* (2016) tienen como objetivo la adquisición del servicio de cambio de carga durante la noche mediante la utilización de G2V y V2G de los PEVS, y nivelar la curva de demanda total como sea posible, en la configuración de flujo de energía bidireccional y algoritmo descentralizado. Sus principales contribuciones se resumen de la siguiente manera:

- 1) Formulan el problema óptimo de desplazamiento de carga como un problema de MDP, cuyo objetivo es hacer que la curva de demanda total sea lo más plana posible, al tiempo que se satisfacen los requisitos de los usuarios de los niveles de batería. Debido a la dureza del problema, proponen una aproximación razonable y solvente que aprovecha al máximo la característica de forma de la curva de demanda base típica durante la

noche. La idea fundamental del problema de aproximación es dividir todo el intervalo de tiempo en dos periodos con un umbral de tiempo óptimo, antes y después del cual los PEV solo cargan y descargan, respectivamente.

- 2) Para el problema de aproximado solucionable, proponen el algoritmo de planificación óptima descentralizada basada en el algoritmo iterativo de llenado de agua, que está descentralizado en el sentido de que los PEVS realizan el cálculo local y se comunican con un agregador.

Se pretende lograr el cambio de carga óptimo de forma descentralizada con la ayuda de un agregador. Se supone que el agregador conoce el pronóstico de la demanda de carga base un día antes. La topología de comunicación entre los PEVS y el agregador es una red en estrella, donde el agregador es el nodo central, mientras que los PEVS son los nodos de la hoja o rama. Los PEVS llevan a cabo una comunicación bidireccional con el agregador. No se requiere que el agregador sea poderosamente computacional, ya que la carga computacional será compartida por cada uno de los PEVS en el algoritmo. Además, el agregador no necesita conocer los parámetros del PEV, por lo cual se mantiene la privacidad de los usuarios. El algoritmo está descentralizado en el sentido de que los PEVS calculan localmente y se comunican con el agregador. Un futuro trabajo del desarrollo de este algoritmo sería considerar curvas de demanda en redes dinámicas, donde los PEVS se pueden unir y salir de vez en cuando, así como la existencia de cargas flexibles y fuentes de energía renovables (Xing *et al.*, 2016).

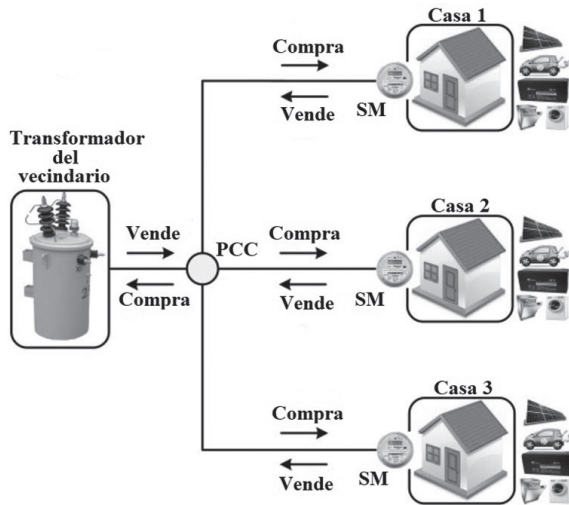
#### OPERACIÓN COORDINADA DE UN VECINDARIO DE HOGARES INTELIGENTES QUE COMPRENDE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS, ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA Y GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Paterakis *et al.* (2016) analizan el funcionamiento óptimo de un vecindario de hogares inteligentes en términos de minimizar el costo total de adquisición de energía. Cada hogar puede comprender varios activos, tales como vehículos eléctricos, electrodomésticos controlables, almacenamiento de energía y generación distribuida. El flujo de potencia bidireccional se considera tanto en el nivel del hogar como en el nivel del vecindario. Además de la unidad de generación distribuida, las opciones tecnológicas como V2H (*Vehicle to Home*)

Vehículo a Casa) y v2G (*Vehicle to Grid/Vehículo a Red*) están disponibles para la energía excesiva de vuelta a la red, respectivamente. Las transacciones de energía tienen un precio basado en los principios de medición neta considerando un esquema de tarifa de fijación de precios dinámica. Además, para evitar los picos de potencia que podrían ser perjudiciales para el transformador, se impone un límite a la potencia total que pueden extraer los hogares. Con el fin de resolver el comportamiento competitivo potencial, especialmente durante periodos de precios relativamente bajos, se propone una estrategia simple para promover el uso justo de la capacidad de distribución del transformador (figura 13) (Paterakis *et al.*, 2016).

Los usuarios finales residenciales reciben señales que varían cada hora a través de su SM (*Smart Meter/Medidor Inteligente*) con el fin de estar motivados para cambiar sus cargas y lograr reducciones en la factura de electricidad. El estudio se centra en la DR (*Demand Response/Respuesta de la Demanda*) incentivada por los precios. La operación de un solo EMS (*Energy Management System/Sistema de Gestión Energética*) bajo un programa dinámico de fijación de precios DR intentaría desplazar tanta carga como sea posible a periodos de precios relativamente bajos. Teniendo en cuenta que más clientes se inscribi-

**Figura 13. El diagrama esquemático de un transformador que sirve a un vecindario compuesto de múltiples hogares inteligentes (Paterakis *et al.*, 2016)**



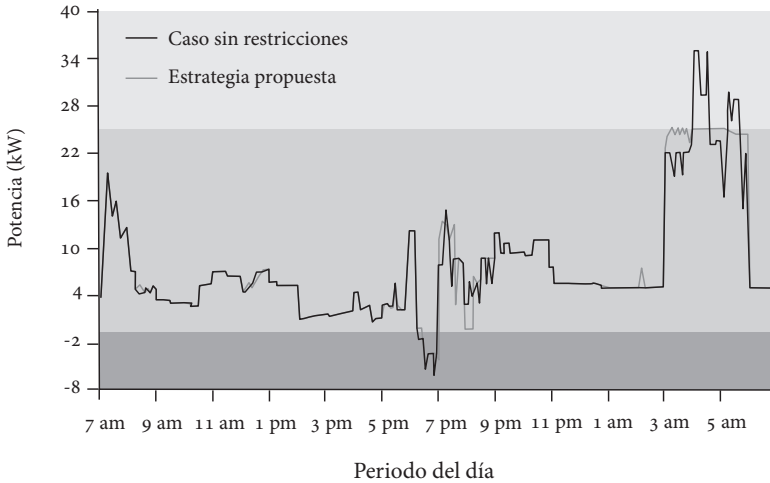
rían en tales programas en el futuro, podrían ocurrir picos de potencia más severos durante periodos de precios relativamente bajos que causarían violaciones a los límites de voltaje y corriente del sistema de distribución y aumentarían la volatilidad del precio de mercado (Paterakis *et al.*, 2016).

Los principales puntos de esta propuesta (Paterakis *et al.*, 2016) son:

- 1) El flujo de potencia bidireccional se considera explícitamente tanto en el nivel de un solo hogar como en el nivel de barrio.
- 2) Se propone una estrategia de coordinación de dos pasos para mitigar el uso desleal de la capacidad del transformador de distribución durante periodos en los que el comportamiento competitivo parecería entre los EMSS de diferentes hogares (por ejemplo, periodos de precios bajos, eventos DR).
  - a) La estrategia propuesta promueve el uso justo de la capacidad del transformador de la siguiente manera: en primer lugar, se supone que la capacidad del transformador se distribuye equitativamente entre los usuarios finales que están conectados al lado del mismo transformador de distribución local. Los costos del hogar se optimizan desde la perspectiva de cada EMS individual.
  - b) El segundo paso es la optimización que se resuelve considerando que las viviendas pueden exceder la capacidad uniformemente distribuida, pero los nuevos costos individuales del hogar deben ser al menos iguales a los que se lograron en el paso anterior. Esta restricción evita que el costo de varios hogares aumente a favor de otros y especialmente aquellos que no necesitan consumir más energía que la capacidad uniformemente distribuida para minimizar aún más el costo individual.

Si el límite de la capacidad del transformador no se aplica, como se esperaba, la optimización de cada EMS doméstico representaría su costo óptimo mínimo. Sin embargo, todos los hogares asignarían tanta carga relacionada con las actividades de carga de vehículos eléctricos y los electrodomésticos controlables como sea posible a los periodos de precios relativamente bajos. Como resultado, durante estos periodos, el transformador de distribución estaría sobrecargado. Esta condición se representa en la figura 14, que muestra la carga total diaria del transformador (Paterakis *et al.*, 2016).

Bajo un esquema de precios dinámicos, el EMS apunta a minimizar su costo de adquisición de energía individual, además de ser una estrategia de coordi-

**Figura 14. Carga total del transformador (Paterakis *et al.*, 2016)**

nación para satisfacer los límites de la capacidad del transformador y, a la vez, promover su uso económicamente justo por parte de los hogares. Todos los posibles flujos de potencia bidireccionales se consideraron entre cada casa y la red y también las casas que constituyen el vecindario. El enfoque incentivaría a los usuarios a cambiar su consumo para obtener facturas de electricidad más bajas. Además, teniendo en cuenta que la participación de los vehículos eléctricos en el mercado del transporte aumentará en los próximos años, la estrategia promueve una introducción más fluida de este nuevo tipo de carga a nivel residencial (Paterakis *et al.*, 2016).

#### UN ENFOQUE DE CONTROL VERSÁTIL Y ÓPTIMO PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS ENCHUFABLES PARA INTEGRAR FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES Y REDES INTELIGENTES

Rahbari *et al.* (2017) proponen una solución práctica para enfrentar los desafíos de fuentes de energía renovables y vehículos eléctricos dentro de la red eléctrica a través de un nuevo controlador inteligente adaptativo, considerando la intermitencia de la fuente de generación y la inconsistencia en el uso de energía. La investigación describe una red inteligente que consiste en centrales eléctricas y generación distribuida, alimentada a través de paneles fotovoltaicos.

cos y turbinas eólicas, aumentada con vehículos eléctricos como dispositivos de almacenamiento de energía. Emplear un estacionamiento para hacer frente a desafíos, tales como la baja penetración de los vehículos eléctricos integrados en las funcionalidades de V2G (*Vehicle to Grid/Vehículo a Red*), encuentra dos dificultades: dónde deben instalarse y cómo modelar el flujo de potencia bidireccional entre los vehículos eléctricos, la red y el sistema de generación distribuida. Además, este estudio sugiere que la red mencionada podría emplear una unidad de control versátil y compleja, capaz de optimizar el punto de operación, programar la carga y descarga para una gran cantidad de vehículos eléctricos, considerando los aspectos técnicos (pérdida total de potencia activa y desviación de voltaje). En este sentido, se propone un nuevo enfoque de control híbrido basado en PSO-ANFIS (*Particle Swarm Optimization-Adaptive Neuro-Fuzzy Inference/Optimización de Multitud de Partículas-Sistema de Inferencia Neuro-Difusa Adaptable*), mediante la utilización del problema de flujo de potencia óptimo.

La primera estrategia está asociada a un flujo de potencia óptimo, que proporciona información útil sobre la compensación entre la demanda de energía, como la demanda de carga y los procesos G2V, y su generación, como los procesos de red, DG (*Distributed Generation/Generación Distribuida*) y V2G. La segunda estrategia es construir un controlador altamente sensible observando el perfil del voltaje y la fluctuación de la pérdida de potencia. Los objetivos principales (Rahbari *et al.*, 2017) son los siguientes:

- 1) Determinar ubicaciones adecuadas de estacionamientos inteligentes y dimensionamiento de HRES (*Hybrid Renewable Energy System/Sistemas Híbridos de Energía Renovables*) mediante la reducción de las pérdidas totales de potencia activa y la mejora de las características de la red, como el perfil de tensión, mediante un algoritmo evolutivo.
- 2) Introducir una nueva operación inteligente, basada en una PSO-ANFIS híbrida, mediante la optimización del proceso G2V y V2G que consiste en sistemas híbridos de energía renovables y sistemas de energía.

Se debe realizar un dimensionamiento y ubicación óptimos de estacionamientos inteligentes en una red de distribución de energía con el fin de desarrollar un ADN (*Active Distributed Network/Red Distribuida Activa*). En este sentido, se consideran criterios en el proceso de optimización, incluyendo la desviación de voltaje, la pérdida total de potencia activa y los costos actuales de O&M (*Operation and Maintenance/Operación y Mantenimiento*) de una

DG. El primero y el segundo objetivo de optimización son disminuir la desviación de voltaje del sistema y las pérdidas de potencia. El tercer objetivo es minimizar el costo anual de O&M de una DG. Estos tres objetivos implican diferentes perspectivas basadas en los servicios públicos y propietarios de una DG. Por ejemplo, agregar más sistemas DG al sistema de distribución puede disminuir las pérdidas de energía, pero aumenta la variación de voltaje y el costo de O&M.

Para integrar los EVs y reducir la fluctuación de las salidas de DG renovables, se introdujo y desarrolló un método de control para abordar eficientemente un problema de flujo óptimo que permite las funcionalidades G2V y V2G y abordar los desafíos de descargas profundas. Este método se comparó con otros reportados en la literatura. Además, el enfoque propuesto podría exhibir capacidades tecno-económicas en la oferta de servicios auxiliares, tales como el aprovechamiento de potencia, la regulación de voltaje y la reducción de los costos de operación del sistema de energía para el sistema de potencia estudiado, al tiempo que tiene los EVs como un componente del sistema. Por lo tanto, el estudio ofreció un enfoque de control inteligente y en tiempo real para brindar opciones y oportunidades beneficiosas para la implementación de EVs en la red eléctrica en sistemas de red inteligente (Rahbari *et al.*, 2017).

#### UN ANÁLISIS COOPERATIVO TEÓRICO DE JUEGOS DEL ESTACIONAMIENTO DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LA RED INTELIGENTE

Los PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle/Vehículos Eléctricos Híbridos Enchufables*) desempeñan un papel importante en la disminución de la cantidad de combustibles fósiles liderados por el sistema de transporte. Los PHEVs en los modos G2V (*Grid to Vehicle/Red a Vehículo*) y V2G (*Vehicle to Grid/Vehículo a Red*) pueden afectar el mercado de energía. Para disminuir los posibles desafíos relacionados con estos efectos, se pueden tener en cuenta varios métodos, como el desarrollo de estrategias óptimas de carga para los PHEVs conectados y la gestión del intercambio de energía entre los estacionamientos de PHEVs. Un modelo de juego cooperativo para determinar el precio de carga/descarga de forma adaptativa se presenta en Aghajani y Kalantar (2017). Las conclusiones muestran cómo este modelo conduce a la maximización de los beneficios de las utilidades y la minimización del costo del estacionamiento.

Además, se ha realizado un análisis estocástico sobre el modelo propuesto con el fin de comprender en qué medida la desviación de la ganancia y el valor esperado de la ganancia se encuentran en diferentes niveles de incertidumbre. Los resultados numéricos demuestran que una mayor desviación sobre el precio del mercado al contado conduce a una mayor media y desviación sobre el beneficio para los servicios públicos, y el propietario de los servicios públicos debe considerar el efecto de la incertidumbre de los precios siempre que sea considerable.

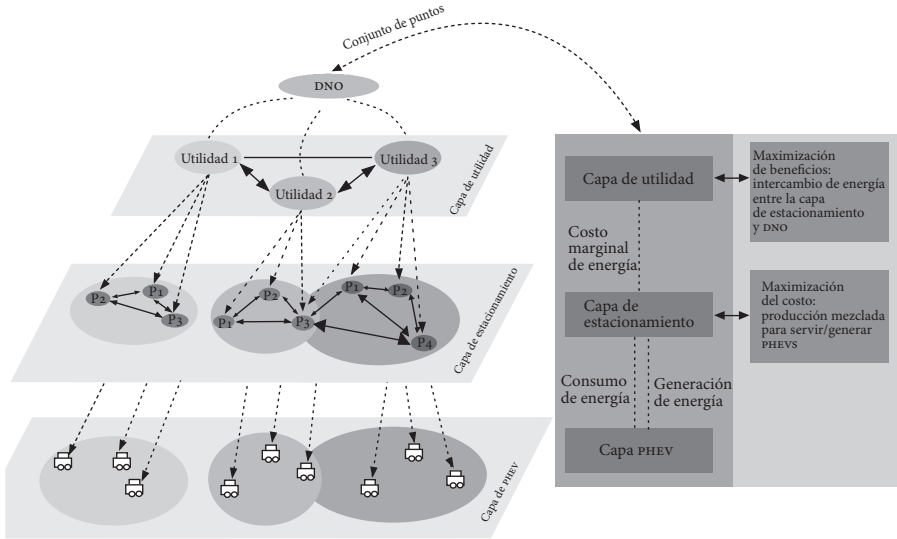
Las principales contribuciones (Aghajani y Kalantar, 2017) se pueden resaltar de la siguiente manera:

- a) Proporcionar un *framework* de juego cooperativo para capturar las interacciones entre los servicios públicos y los estacionamientos.
- b) Minimizar el costo operativo de los estacionamientos y maximizar el beneficio de los servicios públicos.
- c) Proponer un modelo de juego estocástico para las utilidades que tienen la interacción con la red ascendente.
- d) Considerar la degradación de las baterías de PHEV en las funciones de costos operativos para evitar la utilización incorrecta de los almacenamientos.

Para garantizar un funcionamiento confiable, el DNO (*Distribution Network Operator/Operador de Distribución de Red*) debe garantizar que el sistema tenga la reserva de rotación adecuada. Para este propósito, primero el DNO calcula el requisito de rotación de reserva y la reserva de la capacidad disponible de todos los agregadores para tener una programación para el día siguiente. El DNO acepta la oferta de reserva de cada agregador hasta que la suma de todas las ofertas logradas sea menor que el requisito de reserva. El DNO prefiere comprar reservas/energía de agregadores a precios más bajos. Significa que hay competiciones entre agregadores para hacer ofertas estratégicamente.

El juego Stackelberg es un medio adecuado para expresar el concepto detrás del modelo de sistema propuesto. Como se puede ver en la figura 15, las compañías de servicios públicos (agregador) actúan como líderes, anunciando los precios de carga/descarga a los propietarios de los estacionamientos como seguidores. Teniendo en cuenta los precios mencionados, los estacionamientos reaccionarán jugando un juego cooperativo, ya que la decisión de cada estacionamiento afectará intrínsecamente a otros estacionamientos para tomar

**Figura 15. El modelo de sistema propuesto para el manejo de estacionamiento como un juego cooperativo (Aghajani y Kalantar, 2017)**



decisiones. El algoritmo de Stackelberg ha sido diseñado para minimizar la diferencia entre el consumo de energía y la demanda de carga programada, considerando el control de carga/descarga de PHEVs (Aghajani y Kalantar, 2017).

El objetivo principal es la aplicación de la teoría cooperativa de juegos, especialmente Stackelberg, en la determinación del precio en los agregadores y el poder en el nivel inferior (es decir, el estacionamiento). En este sentido, los agregadores reciben los precios de energía de reserva de la red ascendente y tratan de maximizar sus ganancias. El beneficio de cada agregador significa cuánta energía debe comprar en los estacionamientos, así como venderla a la red *upstream* y contribuir en el mercado de reservas. Los agregadores pueden usar la diferencia entre los precios de energía/reserva en la red ascendente y el precio de compra de los estacionamientos para aumentar sus ganancias (Aghajani y Kalantar, 2017).

El uso del modelo de juego cooperativo para la gestión de carga/descarga de PHEV reduce el costo operativo de los estacionamientos a través de la negociación con la empresa sobre el nivel de generación/consumo y el precio de carga/descarga. Se tuvieron en cuenta los aspectos técnicos de los PHEVs, así como los problemas económicos para cargar/descargar PHEV en el mercado de

energía y reservas. Las utilidades que usaban el modelo de juego cooperativo obtienen más ganancias, especialmente cuando tienen más estacionamientos.

Además, el error en la previsión de precios lleva a desafíos para el propietario de los servicios públicos. El objetivo es la maximización del valor esperado del beneficio y la minimización de la desviación del beneficio. Los resultados muestran que un mayor nivel de incertidumbre causa un mayor valor esperado, así como una mayor desviación sobre el beneficio (Aghajani y Kalantar, 2017).

## CONCLUSIONES

El transporte eléctrico es un enfoque prometedor para aliviar el problema del cambio climático. La adopción de vehículos eléctricos en el mercado ha introducido impactos significativos en varios campos, especialmente en la red eléctrica. Se han implementado diversas políticas para fomentar el despliegue de vehículos eléctricos y la tendencia creciente de su adopción en los últimos años ha sido satisfactoria. A pesar de los beneficios ambientales y económicos, la carga de vehículos eléctricos presenta impactos negativos en la operación de red existente; aunque se pueden implementar estrategias de gestión de cobro apropiadas para atender este problema. Además, la integración del vehículo eléctrico en la red inteligente puede brindar muchas oportunidades potenciales, especialmente desde la perspectiva de la tecnología V2G, como la solución para el problema de la intermitencia de la energía renovable. Este capítulo revisa el último desarrollo en tecnologías de vehículos eléctricos y los impactos de las oportunidades de despliegue de vehículos eléctricos traídos por el despliegue eléctrico de la red inteligente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abousleimn, R. y Scholer, R. (2015). "Smart Charging: System Design and Implementation for Interaction Between Plug-in Electric Vehicles and the Power Grid", en *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, núm. 1, pp. 18-25.
- Aghajani, S. y Kalantar, M. (2017). "A cooperative game theoretic analysis of electric vehicles parking lot in smart grid", en *Energy*, vol. 137, pp. 129-139.

- Berthold, F.; Ravey, A.; Blunier, B.; Bouquain, D.; Williamson, S. y Miraoui, A. (2015). "Design and Development of a Smart Control Strategy for Plug-In Hybrid Vehicles Including Vehicle-to-Home Functionality", en *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, núm. 2, pp. 168-177.
- Cao, Y. y Wang, N. (2017). "Toward Efficient Electric-Vehicle Charging Using VANET-Based Information Dissemination", en *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, núm. 4, pp. 2886-2901.
- Kong, P. Y. y Karagiannidis, G. K. (2016). "Charging Schemes for Plug-In Hybrid Electric Vehicles in Smart Grid: A Survey", en *IEEE Access*, vol. 4, pp. 6846-6875.
- Monteiro, V.; Pinto, J. G. y Luiz Afonso, J. (2016). "Operation Modes for the Electric Vehicle in Smart Grids and Smart Homes: Present and Proposed Modes", en *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, núm. 3, pp. 1007-1020.
- Morais, H.; Sousa, T.; Vale, Z. y Faria, P. (2014). "Evaluation of the electric vehicle impact in the power demand curve in a smart grid environment", en *Energy Conversion And Management*, vol. 82, pp. 268-282.
- Nezamoddini, N. y Wang, Y. (2016). "Risk management and participation planning of electric vehicles in smart grids for demand response", en *Energy*, vol. 116, pp. 836-850.
- Paterakis, N. G.; Erdinç, O.; Pappi, I. N.; Bakirtzis, A. G. y Catalão, J. P. S. (2016). "Coordinated Operation of a Neighborhood of Smart Households Comprising Electric Vehicles, Energy Storage and Distributed Generation", en *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, núm. 6, pp. 2736-2747.
- Rahbari, O.; Vafaeipour, M.; Omar, N.; Rosen, M. A.; Hegazy, O.; Timmermans, J. M.; Heibati, S. y Van Den Bossche, P. (2017). "An optimal versatile control approach for plug-in electrical vehicles to integrate renewable energy sources and smart grids", en *Energy*, vol. 134, pp. 1053-1067.
- Shaukat, N.; Khan, B.; Ali, S. M.; Mehmood, C. A.; Khan, J.; Farid, U.; Majid, M.; Anwar, S. M.; Jawad, M. y Ullah, Z. (2018). "A survey on electric vehicle transportation within smart grid system", en *Renewable an Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, part. 1, pp. 1329-1349.
- Xing, H.; Fu, M.; Lin, Z. y Mou, Y. (2016). "Decentralized Optimal Scheduling for Charging and Discharging of Plug-In Electric Vehicles in Smart Grids", en *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, núm. 31, pp. 4118-4127.
- Ye, F.; Qian, Y. y Qingyang Hu, R. (2017). "Incentive Load Scheduling Schemes for PHEV Battery Exchange Station in Smart Grid", en *IEEE Systems Journal*, vol. 11, núm. 2, pp. 922-930.

- Zhang, L. y Li, Y. (2017). “Optimal Management for Parking-Lot Electric Vehicle Charging by Two-Stage Approximate Dynamic Programming”, en *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, núm. 4, pp. 1722-1730.
- Zhao, J.; Wan, C.; Xu, Z. y Wong, K. P. (2016). “Spinning Reserve Requirement Optimization Considering Integration of Plug-In Electric Vehicles”, en *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, núm. 4, pp. 2009-2021.



## Sobre los autores



ESTRELLA M. GARCÍA LOZANO es ingeniera técnica de Telecomunicación, con especialidad en Telemática en 2006; Máster en Ingeniería Telemática en 2008 y doctora en 2016, por la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M). Ha trabajado como investigadora contratada a proyecto, y de 2008 hasta 2016 ha sido ayudante en el Departamento de Ingeniería Telemática de la UC3M. Es coautora de varias revistas JCR y cuenta con varias contribuciones en congresos nacionales e internacionales. Ha participado de forma activa en varios proyectos nacionales e internacionales.

---



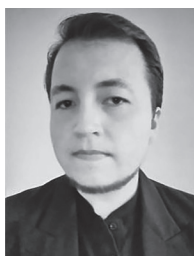
CELESTE CAMPO es ingeniera de Telecomunicación por la Universidad de Vigo en 1998 y doctora por la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M) en 2004. En la actualidad es Profesora Titular de Universidad en el Departamento de Ingeniería Telemática de la UC3M desde 2007. Es coautora de una veintena de artículos en revistas, la mayoría de ellas indexadas en el JCR. Es coautora de más de 50 contribuciones a congresos nacionales e internacionales. Ha participado en varios proyectos de investigación europeos, nacionales y autonómicos. También ha colaborado en varios contratos con empresas.

---



CARLOS GARCÍA RUBIO es ingeniero de Telecomunicación y doctor ingeniero de Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Madrid en 1993 y 2001, respectivamente. Desde 2002 es Profesor Titular de Universidad en la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M). Es coautor de una veintena de artículos en revistas, la mayoría de ellas indexadas en el JCR. Es coautor de más de sesenta contribuciones a congresos nacionales e internacionales. Ha participado en varios proyectos de investigación europeos, nacionales y autonómicos, siendo investigador principal en gran parte de ellos. También ha colaborado en varios contratos con empresas.

---



MARCO DANIEL CAIZA CHANGOLUISA nació en Quito, Ecuador. Es técnico industrial con especialidad en electricidad y electrónica. Egresó de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones por la Escuela Politécnica Nacional en 2016 y actualmente realiza su proyecto de titulación con la simulación de redes vehiculares. Fue presidente del capítulo de Comunicaciones COMSOC IEEE EPN en 2013 y vicepresidente de la Rama Estudiantil IEEE EPN en 2014. Cuenta con tres años de experiencia en el desarrollo de planos de planta externa para constructoras de eléctrica y de última milla en redes GPON para constructoras de telecomunicaciones. Dictó el seminario AutoCAD 2D enfocado a planos para la Rama Estudiantil IEEE en la Escuela Politécnica Nacional en 2014. Participó como expositor con el tema «VANET tu vehículo en red» en el marco de HÁBITAT III en 2016. Es miembro estudiantil del IEEE.

---



CHRISTIAN JOSÉ TIPANTUÑA TENELEMA nació en Quito, Ecuador. Se graduó en Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones por la Escuela Politécnica Nacional (EPN) en 2011. Sus estudios de maestría en Sistemas Inalámbricos y Tecnologías Relacionadas los realizó en el Politécnico di Torino, en Turín, Italia, en 2013. Actualmente es Profesor Titular Auxiliar en la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Sus

áreas de interés incluyen sistemas de red, redes definidas por *software*, funciones de virtualización de red y radio definida por *software*.



MARTHA CECILIA PAREDES PAREDES recibió los títulos de ingeniera en Electrónica y Redes de Información por la Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito, Ecuador, en 2008, de MSc. y Ph.D en Multimedia y Comunicaciones por parte de la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M), Madrid, España, en 2010 y 2014, respectivamente. Además, de 2010 a 2011 trabajó como Profesora Ocasional en la Universidad de las

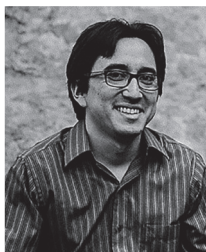
Américas (UDLA), Quito, Ecuador. Actualmente trabaja como Profesora Titular Auxiliar en el Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de Información (DETRI) en la Escuela Politécnica Nacional en Quito, Ecuador. Sus principales áreas de interés incluyen las comunicaciones inalámbricas, el procesamiento de señales para comunicaciones y las transmisiones multiporadoras, especialmente OFDM.



CAROLINA TRIPP BARBA es licenciada en Informática por la Universidad Autónoma de Sinaloa, obtuvo su Maestría y Doctorado en Ingeniería Telemática en la Universidad Politécnica de Cataluña en 2009 y 2013, respectivamente. Es Profesora Investigadora de Tiempo Completo Titular «B», adscrita a la Facultad de Informática Mazatlán de la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS). Es coautora de artículos en revistas

JCR, congresos nacionales e internacionales sobre redes vehiculares. Es revisora de revistas indexadas y miembro del comité científico de diversas conferencias internacionales. Ha sido la encargada de publicidad del ACM PEWASUM 2011 a 2013 y Co-Chair en 2015. Editora invitada de la revista *Ad Hoc Networks* (Elsevier). Investigadora en el SSIT (2014-2017). Su línea de investigación se enfoca en el diseño y mejora de protocolos de encaminamiento para redes vehiculares, incluyendo el análisis en la toma de decisiones, ancho de banda disponible en los canales inalámbricos y diseño de escenarios realistas. Miembro del SNI-1 2018-2020.

---



LUIS F. URQUIZA AGUIAR es ingeniero en Electrónica y Redes de Información por la Escuela Politécnica Nacional (EPN) de Ecuador. Recibió los títulos de máster y doctor en Ingeniería Telemática por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) de España en 2012 y 2016, respectivamente. Tiene la acreditación de Investigador Agregado 2 de la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia y Tecnología (SENESCYT).

Actualmente se desempeña como profesor ocasional en el Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de Información de la EPN. Sus intereses de investigación están enfocados en las redes vehiculares y optimización.

---



CRISTIAN O. RODRÍGUEZ SANTIAGO nació en la ciudad de Cuenca, Ecuador, el 15 de mayo de 1992. Actualmente es estudiante de la carrera de Ingeniería Electrónica y Redes de Información en la Escuela Politécnica Nacional. Ha colaborado como asistente de investigación en proyectos Junior de la Escuela Politécnica Nacional y CEPRA-CEDIA. Sus áreas de investigación son redes Ad hoc, desarrollo de *software* y Smart Cities.

---



XAVIER CALDERÓN HINOJOSA nació el 16 de agosto de 1972 en Quito, Ecuador; se graduó en el Colegio La Salle y tiene especialidad en Físico-Matemáticas. Obtuvo el título de ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones en la Escuela Politécnica Nacional y es máster en Tecnologías de la Información por la Universidad Politécnica de Madrid. Actualmente es profesor principal a tiempo completo en la Escuela

Politécnica Nacional. Ha sido miembro del Consejo de Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de Información, jefe del Laboratorio de Informática de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, director de Proyectos de Investigación: Semilla y Junior en la Escuela Politécnica Nacional, codirector del Proyecto de Investigación CEPRA-CEDIA y jefe del Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de Información (DETRI).

---



JUAN FELIPE BOTERO es profesor asistente en el Departamento de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad de Antioquia (UdeA), Medellín, Colombia. En 2006 recibió su título de ingeniero de Sistemas de la Universidad de Antioquia; en 2008, de máster en Ingeniería Telemática de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona, España, y en 2013, de Ph.D. en Ingeniería Telemática de la UPC. En 2013 ingresó al Grupo de Investigación en Telecomunicaciones Aplicadas (GITA) de la UdeA. Sus principales intereses de investigación son calidad de servicio, redes definidas por *software*, virtualización de redes e IoT.

---



NATALIA GAVIRIA GÓMEZ es profesora del departamento de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la UdeA, donde se ha desempeñado también como investigadora del Grupo de Investigación en Telecomunicaciones Aplicadas (GITA); fue jefe del Centro de Investigaciones Ambientales y Decana Encargada de la Facultad de Ingeniería. Actualmente se desempeña como directora de la Sede de Investigaciones Universitaria (SIU). Sus principales intereses de investigación son la calidad de servicio, las redes inalámbricas, IoT y el manejo del tráfico por medio de procesos estadísticos.

---



LINA MARÍA HINCAPIÉ es ingeniera de Telecomunicaciones de la Universidad de Antioquia (UdeA). Actualmente cursa la Maestría en Ingeniería de Telecomunicaciones de la UdeA, trabajando en el tema de planificación de redes IoT por medio de técnicas de redes definidas por *software*.

---



NELY PATRICIA LÓPEZ MÁRQUEZ es ingeniera en Telemática por el Centro Universitario del Norte (CUNorte) de la Universidad de Guadalajara (UdeG) en Jalisco, México. En 2012, con el proyecto “Performance Evaluation of Bandwidth-Aware Routing Protocols in Urban Scenarios for Vehicular Ad hoc NETWORKS”, se título de máster en Ingeniería Telemática por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) en Barcelona, España. De 2012 a 2016 se desempeñó como profesora de asignatura adscrita al Departamento de Productividad y Desarrollo Tecnológico en el CUNorte. Actualmente realiza estudios de doctorado en la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) para obtener del grado de doctora en Ingeniería Telemática. Sus áreas de interés son redes vehiculares, vehículos eléctricos, electrolinerías, redes inteligentes, ciudades inteligentes, entre otras.

---



LETICIA LEMUS CÁRDENAS es profesora asociada en el Departamento de Productividad y Desarrollo Tecnológico del Centro Universitario del Norte (CUNorte) de la Universidad de Guadalajara (UdeG) desde 2012. Obtuvo el grado de ingeniera en Telemática por la UdeG en 2007 y el de maestra en Ingeniería Telemática por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) en 2011. Actualmente es candidata a doctora en el Departamento de Ingeniería Telemática (ENTEL) de la Universidad Politécnica de Cataluña. Su área de investigación comprende tecnologías inalámbricas, protocolos de enrutamiento, aprendizaje de máquina, vehículos autónomos en entornos de red y ciudades inteligentes.

---



MÓNICA AGUILAR IGARTUA es máster y doctora en Ingeniería de Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) desde 1995 y 2000, respectivamente. Es profesora titular de universidad y miembro del Grupo de Servicios Inteligentes de Sistemas de Información y Redes de Comunicación (<http://siscom.upc.edu/>) del Departamento de Ingeniería Telemática de la UPC. Sus intereses de investiga-

ción se enfocan en el diseño, modelado analítico y evaluación de prestaciones de servicios multimedia sobre redes vehiculares ad hoc (VANET) en ciudades inteligentes. Participa en diversos comités de programa de congresos y revistas. Es coautora de una veintena de artículos indexados y numerosos artículos de congresos.

---

*Redes vehiculares: Servicios, Oportunidades y Retos,*  
de Carolina Tripp Barba y José Alfonso Aguilar Calderón (coordinadores),  
se terminó de imprimir en mayo de 2020  
en los talleres de la Imprenta Pandora, S. A. de C.V.,  
ubicados en Caña 3657, La Nogalera,  
C.P. 44470, Guadalajara, Jalisco.  
La edición consta de 300 ejemplares.

En los últimos años hemos estado viviendo una importante revolución en el campo de los vehículos denominados inteligentes, los cuales tienen la capacidad de comunicarse entre sí y con la infraestructura de la ciudad y de las carreteras. El desarrollo de las redes vehiculares involucra a diversos actores, como científicos que focalizan su investigación en el perfeccionamiento de la tecnología implicada, fabricantes de automóviles que ven interesantes oportunidades de diseño y mejora de sus vehículos, gobiernos que identifican una ocasión de reducir la siniestralidad en las carreteras y los índices de contaminación en las ciudades, además de los conductores y ciudadanos cuya seguridad vial y calidad de vida puede mejorar sustancialmente.

Este libro provee una visión general de las redes vehiculares *ad hoc*, describe sus conceptos fundamentales, la tecnología implicada que permite la comunicación entre vehículos y con la infraestructura, y las principales aplicaciones que podrán ser desplegadas. Incluye una descripción de las más novedosas propuestas de protocolos de encaminamiento y de disseminación de mensajes en redes VANET. Presenta casos de aplicación en una gran ciudad como Quito, Ecuador. También incluye un estudio sobre la Internet de las Cosas, las redes definidas por *software* y su relación con las redes vehiculares. Finalmente, muestra la novedad de las redes vehiculares, incluyendo coches autónomos y eléctricos, así como analiza interesantes evaluaciones de prestaciones mediante simuladores VANET.

MÓNICA AGUILAR IGARTUA  
Universidad Politècnica de Catalunya



ISBN: 978-607-737-292-9

