

# Comunicaciones en el entorno del automóvil

Iván Lequerica Roca  
Telefónica I+D  
Emilio Vargas 6, 28043 Madrid  
Teléfono 913379436  
ilr@tid.es

**RESUMEN:** En el presente artículo se aporta una visión de los aspectos más importantes de las comunicaciones en el entorno del automóvil como son tecnologías utilizadas y protocolos de encaminamiento.

Cubriendo más en detalle las comunicaciones entre vehículos (también conocidas como V2V, car2car o VANETs “Vehicular Ad Hoc Networks”), se ofrece una comparativa de rendimiento de los diferentes protocolos usados en escenarios realistas.

## 1. Introducción

Cualquier sistema de comunicaciones a desplegar en los automóviles tiene como principal requisito soportar las velocidades elevadas a las que se desplazan haciendo indispensable el uso de tecnologías inalámbricas.

En los últimos años se ha producido un auge en el uso de las redes inalámbricas aportando movilidad al acceso de información. Es el paradigma de “Always On- Always Connected”. Estas redes inalámbricas tradicionalmente se han dividido atendiendo a su alcance. De esta forma aparecen:

- wPAN. Wireless Personal Area Networks. Son redes de corto alcance, típicamente decenas de metros, que interconectan los dispositivos personales de un usuario; PDA, teléfono móvil, portátil, manos libres, etc. Un ejemplo de estas redes es la tecnología Bluetooth
- wLAN. Wireless Local Area Networks. Cubren típicamente el entorno de un edificio, como oficinas o bloques de viviendas aunque también se están desplegando con éxito en entornos urbanos (conocidas como wMAN). Son redes nómadas ya que se pueden trasladar fácilmente. Los equipos controladores de este tipo de redes se llaman Puntos de acceso o APs. La tecnología estrella de este grupo está basada en los estándares IEEE 802.11b/g también conocida como WiFi. Esta tecnología es capaz de proporcionar 54 Mbps en rangos de cobertura de hasta 500 metros. La futura 802.11n aumentará la cobertura considerablemente y llegará a tasas de hasta 500 Mbps.
- wWAN. Wireless Wide Area Networks. Estas redes ofrecen cobertura mundial o por lo menos continental. En este grupo entran las redes celulares de telefonía (GSM, GPRS, UMTS...) y las redes satelitales (actualmente estandarizadas con DVB-S).

La forma más común de trabajo de las redes inalámbricas es aquella en la cual los clientes móviles se conectan a una estación base (BS) que controla las comunicaciones. Esta BS cubre una cierta área de trabajo en la cual todos los clientes que controla pueden comunicarse entre sí permitiendo alcanzar a clientes de otras redes a través de otro segmento generalmente fijo.

En contraposición a este tipo de redes se encuentran las redes ad hoc, y más concretamente las MANETs (Mobile Ad Hoc Networks). En este tipo de redes no existe infraestructura de red sino que se compone de los propios nodos móviles autónomos comunicándose entre sí por enlaces inalámbricos. En este entorno los nodos participan en las decisiones de encaminamiento y son los responsables implícitamente del mantenimiento de la red. Dentro de las características principales de estas redes se encuentran el autodescubrimiento de nodos y la autoconfiguración de la red, es decir, que son sensibles a los cambios de topología reconfigurándose de manera dinámica y automática. Estas características hacen muy atractivas a estas redes para los escenarios típicos de las comunicaciones del automóvil:

- Comunicaciones entre vehículos o V2V (Vehicle to vehicle communications)
- Comunicaciones con la infraestructura o V2I (Vehicle to vehicle communications) multitud de escenarios en los que la topología de los nodos a comunicar varía rápidamente

En ambos tipos de comunicaciones la naturaleza de la conexión puede ser muy diversa, desde aplicaciones para mejorar la seguridad, hasta servicios de entretenimiento.

Aunque las tecnologías wWAN puede ser un complemento importante en las comunicaciones del automóvil, incluso necesario en fases iniciales del despliegue y aplicaciones críticas en las que se hace necesario asegurar la conexión, en este artículo nos centraremos en las redes MANET y su uso para en comunicaciones V2V.

En el capítulo 2 se muestra un resumen de las tecnologías utilizadas en este tipo de redes explicando con más detalle aquella desarrollada específicamente para este objetivo: 802.11p.

En el capítulo 3 se detallan los protocolos a nivel de red más utilizados en MANETs y su clasificación atendiendo al alcance, el tipo de algoritmo y esquema de descubrimiento de rutas.

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos por simulación con comparativas de rendimiento de los diferentes protocolos en escenarios realistas de comunicaciones en autopistas y circuitos urbanos.

Quedan fuera del alcance de este artículo algunos aspectos de estas comunicaciones como seguridad, calidad de servicio (QoS) y descubrimiento de servicios descritos en [13].

## 2. MANETs

### 2.1. Características

Veamos a continuación el conjunto de características principales de estas redes:

- **Autonomía.** Cada Terminal es un nodo autónomo con capacidad de procesado de la información y de encaminamiento de información proveniente de otros nodos de la misma red. Gracias a esto el funcionamiento de la red no depende de ninguna infraestructura previa siendo así más tolerante a fallos del sistema.
- **Control distribuido de la red.** Debido a la ausencia de infraestructura para el control de la red, este se realiza de forma distribuida en cada nodo.
- **Encaminamiento.** Es necesario que cada nodo por separado y todos en su conjunto sean capaz de proporcionar un mecanismo dinámico de encaminamiento. Este encaminamiento multihop se basa en las capacidades de cada nodo. Los protocolos de encaminamiento clásicos no sirven en este contexto ya que no están preparados para estas variaciones de topología, puede que no converjan. Actualmente se están desarrollando multitud de algoritmos de encaminamiento para solucionar el problema. Más adelante detallaremos los más importantes en otra sección.
- **Topología de red variable.** En una MANET los nodos pueden moverse de forma arbitraria, aunque generalmente lo hagan siguiendo ciertos patrones de movimiento, por ejemplo siguiendo las trayectorias de una autopista. Debido a esto, la red se puede subdividir en varias y producir importantes pérdidas de paquetes. Son necesarios mecanismos que detecten estas circunstancias y minimicen sus efectos.
- **Capacidad variable de los enlaces.** Esta característica se produce en todas las comunicaciones inalámbricas, es intrínseca al medio de transmisión pero sus efectos se agravan más en las MANETs. Esto se debe a que cada nodo actúa como router y la información atraviesa múltiples enlaces inalámbricos.
- **Terminales limitados.** En muchos casos los nodos de este tipo de redes serán terminales ligeros con capacidades limitadas de procesamiento, comunicación y alimentación

por lo que es primordial que los algoritmos utilizados optimicen estos tres recursos.

### 2.2. Tecnologías inalámbricas

A continuación se muestran un conjunto de tecnologías inalámbricas susceptibles de ser utilizadas por las MANETs y sus características principales:

- **WiFi.** Basado en el estándar IEE 802.11, opera en las bandas libres. Las versiones b y g se han extendido mucho hasta el punto de que la mayoría de los equipos portátiles y PDAs la traen incorporada de serie, tienen un alcance de centenares de metros y un ancho de banda de hasta 54 Mbps. La futura 802.11n aumentará la cobertura considerablemente y llegará a tasas de hasta 500 Mbps. Aunque inicialmente tuvo serios problemas de seguridad y no disponía de soporte para QoS, se definieron los estándares 802.11i y 802.11e que se encargan de estos aspectos.
- **WiMAX.** Basada en el estándar IEE 802.16 puede operar en bandas con o sin licencia. Proporciona tasas de transferencia de hasta 75Mbps con rangos de cobertura de hasta 50Km. La variante 802.16e soporta movilidad. El aspecto de la seguridad está bien resuelto gracias al control de acceso basado en 802.1X y EAP y al cifrado AES (Advanced Encryption Standard). Se soporta calidad de servicio de forma nativa.
- **Bluetooth.** También conocido como 802.15.1. Es la tecnología más extendida en cuanto a comunicaciones inalámbricas personales (wPAN). Hay varias clases dependiendo de su alcance y consumo de potencia, alcanzando tasas de 2 Mbps y rangos de hasta 100 m. Opera en banda libre y sus mecanismos de seguridad son suficientemente robustos.
- **UWB.** Ultra Wide Band es un estándar basado en 802.15.3 que funciona emitiendo a muy baja potencia en un espectro enorme. Su alcance es muy limitado (<10m) pero proporciona tasas de transferencia muy elevadas llegando a los 480 Mbps. Su consumo de energía es muy reducido.
- **ZigBee.** Es la tecnología más utilizada actualmente en redes de sensores ad hoc. Se basa en el estándar 802.15.4. Presenta anchos de banda muy pequeños y coberturas reducidas (250 Kbps hasta 75m). Es de gran utilidad para enviar poca información en pequeñas distancias. La gran ventaja es que su consumo es extremadamente reducido.
- **802.11s.** Se pretende que sea un estándar sobre "Mesh Networking". Especifica una extensión a la capa MAC del IEE 802.11 para resolver el problema de la interoperabilidad de muchos nodos de forma eficiente. Define una arquitectura y un protocolo para soportar comunicaciones unicast, broadcast y multicast sobre topologías multi-hop usando métricas a nivel radio.

## 2.2.1. 802.11p

Las tecnologías anteriormente descritas se diseñaron para un fin distinto de las comunicaciones entre nodos con rápidos cambios de topología. Para cubrir este problema se creó un grupo de trabajo en el IEEE con el objetivo de crear un estándar para las comunicaciones entre vehículos. Esta tecnología es 802.11p [12], también conocida como Wireless Access for the Vehicular Environment (WAVE).

WAVE es una evolución del estándar IEEE802.11a con modificaciones a nivel físico y MAC para mejorar su comportamiento en el entorno vehicular. Al igual que IEEE802.11a, WAVE utiliza OFDM, pero con tasas de transmisión de 3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24, y 27 Mbps en canales de 10 MHz. Utiliza 52 sub-portadoras moduladas utilizando BPSK, QPSK, 16-QAM o 64-QAM así como codificaciones de ratios 1/2, 2/3, o 3/4.

En cuanto a la canalización, la norma define 7 canales no solapados de 10MHz en la banda de los 5.9GHz: 6 canales de servicio (SCH) y uno de control (CCH). El CCH es utilizado como canal de referencia para realizar una primera detección de los vehículos cercanos como paso previo al establecimiento de las comunicaciones. Al mismo tiempo, dicho canal es utilizado para anunciar los servicios disponibles en los canales SCH (acceso a Internet, descarga de contenidos, etc.). Teniendo en cuenta que el canal CCH es el canal de referencia, WAVE lo emplea para la transmisión en modo broadcast de mensajes de seguridad vial. Por la importancia de los mensajes que se transmiten y la necesidad de garantizar su correcta recepción, el canal CCH transmite con una tasa de datos de 6Mbps, correspondiente a una modulación QPSK con un ratio de codificación de 1/2.

En la capa MAC, WAVE también utiliza el método de acceso de IEEE802.11, basado en CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Para mitigar el problema del hidden terminal, WAVE mantiene el intercambio de mensajes RTS/CTS (Request-To-Send/Clear-To-Send), aunque se encuentra deshabilitado en el canal CCH por transmitir siempre en modo broadcast. Como consecuencia, todos los nodos que utilizan el canal de control están sujetos a dicho problema, incrementando el riesgo de pérdidas de paquetes y de congestión de canal.

## 3. Encaminamiento

Este es uno de los campos dónde se está trabajando más intensamente, en la actualidad existen más de 80 protocolos de encaminamiento. La explicación a este gran número es que todavía están en fase de investigación y dentro del IETF solo tres protocolos han llegado al nivel de RFC (Request for Comment), estos protocolos son:

- “Ad hoc On Demand Distance Vector” (AODV) [1]
- “Optimized Link State Routing Protocol” (OLSR) [2]

- “Topology Broadcast based on Reverse-Path Forwarding” (TBRPF)

Existen varias formas de clasificar los protocolos de encaminamiento de este tipo de redes, veamos un esquema de todas ellas para posteriormente entrar en detalle:

- Atendiendo al alcance de las mismas; unicast, broadcast y multicast
- Atendiendo al esquema de descubrimiento de rutas; proactivos, reactivos e híbridos
- Atendiendo al tipo de algoritmo en que se basan; vector de distancias, estado de enlace, con ayuda de información geográfica, basados en zonas, etc.

Los protocolos unicast son aquellos que transmiten información de un único emisor a un único receptor, en contraposición a los multicast en los que la información se envía a un grupo de nodos, previamente creado. Hay dos casos particulares como son el broadcast en el que se envía la información a todos los nodos de una red y el anycast dónde el destinatario es único, pero uno cualquiera no especificado.

Un caso especial del multicast de gran utilidad en las MANET el geocast, consiste en enviar información desde un emisor a un grupo de receptores situados en cierta área geográfica. En este caso no es necesario unirse a un grupo previamente, solo por su posición geográfica un nodo recibirá o no los paquetes enviados.

Las MANETs a la hora de descubrir las rutas hacia los destinos utilizan dos esquemas diferentes. Los algoritmos proactivos son aquellos que periódicamente actualizan las rutas en la red, en todo momento tienen conocimiento de la topología de la red intentando tener optimizadas las rutas para el momento en que sea necesario enviar información. En oposición a estos se encuentran los protocolos reactivos, los cuales solamente buscan la ruta hacia un destino en el momento en el que necesitan enviar información. Los protocolos híbridos combinan los dos esquemas utilizando, por ejemplo, proactividad en las cercanías del nodo pero buscando las rutas a nodos alejados en el momento que son necesarias. El mejor mecanismo depende de cada escenario y patrón de movimiento concretos pero, en cualquier caso, hay que llegar a un compromiso entre la frescura de las rutas, el overhead o sobrecarga en el envío de información en el descubrimiento/mantenimiento de las rutas y la latencia en el descubrimiento. La latencia será menor en los proactivos ya que las rutas están actualizadas en todo momento mientras que el overhead es menor en los reactivos ya que solo hay señalización cuando es necesario buscar las rutas.

Atendiendo al tipo de algoritmo de encaminamiento podemos encontrar varios grupos. Los basados en vector de distancias trabajan de forma que los nodos de la red intercambian periódicamente sus vectores de distancia con sus vecinos (nodos adyacentes, conectados directamente a ellos por un enlace) de tal

manera que un nodo recibe de sus vecinos sus respectivos vectores de distancia. Con esa información, y sabiendo la distancia estimada a cada uno de sus vecinos, un nodo puede decidir por cuál de sus vecinos se consigue el mejor camino para llegar a un destino.

En los algoritmos basados en el estado de los enlaces, los nodos monitorizan el estado de los enlaces con sus vecinos y difunden esta información. Cada nodo conoce el estado de todos los enlaces y puede calcular todas las rutas utilizando el algoritmo pero, sin embargo, los nodos solo envían el paquete al siguiente nodo de la ruta, con la dirección de destino de los paquetes y este último será el encargado de calcular a que nodo retransmitirlo.

En los algoritmos que utilizan información geográfica, se hacen cálculos de dónde se estima que pueda estar el o los nodos destinos y se encamina la información en esa dirección. Otros algoritmos dividen la red en subzonas y dependiendo de en que zona se encuentre un nodo hace una cosa u otra con la información recibida; descarta el paquete, lo reenvía a uno de sus vecinos, hace broadcast, etc.

A continuación se detallan los principales protocolos de encaminamiento unicast para presentar en un capítulo posterior los resultados de simulación de estos en varios escenarios realistas de comunicaciones entre vehículos.

### 3.1. DSDV

Destination-Sequenced Distance-Vector Routing [3]. Es un protocolo unicast proactivo adaptado del tradicional RIP (Routing Information Protocol). Añade un nuevo atributo en la tabla de rutas usado por RIP; el número de secuencia, permitiendo distinguir información antigua de la reciente y evitando bucles en las rutas.

Con este protocolo cada nodo mantiene una tabla de rutas que lista todos los posibles destinos, la métrica, el siguiente salto y el número de secuencia (generado por el nodo destino). Cada nodo de la red Ad-hoc actualiza la tabla con anuncios periódicos o cuando un cambio significativo se produce en la red manteniendo coherente la información ante cambios dinámicos de topología.

Para conseguir una cierta consistencia en las tablas de rutas de cada nodo al cambiar la topología de la red, los anuncios con información de encaminamiento deben ser frecuentes y suficientemente rápidos para que cada nodo pueda localizar al resto.

### 3.2. AODV

Ad-hoc On-Demand Distance-Vector Routing [1]. Este protocolo reactivo unicast se construye sobre el protocolo DSDV analizado previamente. La mejora consiste en minimizar el número de broadcasts requeridos para crear rutas, ya que al ser bajo demanda los nodos que no están en el camino elegido no tienen que mantener la ruta ni participar en intercambios de tablas.

Cuando un nodo desea transmitir hacia un destino y no tiene una ruta válida, comienza el proceso de descubrimiento (Path Discovery). Para esto, en primer lugar, hace un broadcast del paquete RREQ a sus vecinos, que a su vez se lo envían a sus vecinos y así sucesivamente hasta llegar al destino o a algún nodo intermedio que tenga una ruta al destino creada recientemente. Al igual que en DSDV se utilizan números de secuencia para identificar las rutas más recientes y eliminar los bucles.

Cada nodo mantiene dos contadores: el número de secuencia propio del nodo (para evitar los bucles) y el broadcast ID que es aumentado cuando un broadcast es iniciado en el nodo.

Una vez que el “nodo destino/nodo intermedio con ruta fresca” ha sido encontrado, éste responde con un paquete RREP al vecino del cual recibió el primer RREQ. El RREP contiene los siguientes campos: dirección origen, dirección destino, número de hops, número de secuencia del destino, tiempo de expiración para el camino de vuelta. El RREP utiliza el camino de regreso establecido hacia el nodo origen, en este camino todos los nodos por lo que pasa el RREP apuntan la ruta de vuelta como la ruta más fresca al nodo destino. Por este motivo AODV sólo soporta enlaces bidireccionales.

Un aspecto adicional es el uso de mensajes “Hello” (broadcast periódicos) para informar a un nodo móvil sobre todos los nodos del vecindario.

### 3.3. DSR

Dynamic Source Routing [4]. Este protocolo reactivo unicast se basa en el concepto de “Source Routing”, técnica en la cuál el nodo origen tiene que determinar la secuencia completa de todos los nodos por los que el paquete tendrá que pasar hasta llegar al destino. Esta ruta es agregada explícitamente en la cabecera del paquete y permite actualizar la información que tienen almacenada los nodos de la ruta. Como no existen actualizaciones periódicas en este protocolo, cuando un nodo necesita una ruta hacia otro, la determina dinámicamente basándose en la información que tiene almacenada y en los resultados de un protocolo de descubrimiento de ruta similar al que se utiliza en DSDV.

El protocolo presenta de 2 fases: el descubrimiento y el mantenimiento de rutas. Cuando un nodo tiene que transmitir información a un destino, primero revisa su tabla para determinar si ya tiene una ruta a ese destino. Si no la tiene, entonces comienza el descubrimiento mediante un broadcast del Route Request Packet (RREQ). Este paquete contiene la dirección de destino, la dirección del nodo fuente y un número único de identificación.

Un Route Reply Packet (RREP) es enviado cuando el RREQ alcanza el destino o un nodo intermedio que ya dispone de la ruta hacia el destino.

El mantenimiento de rutas es realizado para monitorizar el funcionamiento de una ruta e informar al nodo fuente sobre cualquier error de enrutamiento. En este tipo de redes esta monitorización se realiza entre nodos consecutivos. Se producen paquetes de

error (Route Error Packets) cuando la capa de enlace encuentra un problema grave de transmisión.

### 3.4. FSR

Fish State Routing Protocol [5] y [6]. Este protocolo proactivo está basado en el concepto de “estado de enlaces” (Links State). FRS provee una estructura de encaminamiento implícitamente jerárquica. El algoritmo de encaminamiento consiste en mantener distancias exactas y alta calidad en la información de las rutas para el vecindario más cercano de un nodo, e ir progresivamente disminuyendo los detalles a medida que la distancia al nodo aumenta.

FSR funciona de manera similar al algoritmo de estado de enlace, es decir, la información del estado de los enlaces es generada y difundida a la red cuando un nodo detecta un cambio topológico de la red. Sin embargo, la diferencia es que en este protocolo los paquetes no inundan la red, sino que periódicamente se produce el intercambio de información sólo entre los vecinos locales. En la implementación de este protocolo, cada nodo almacena una lista y tres tablas:

- Lista de vecinos
- Tabla con la topología (TT)
- Tabla con el próximo salto de la ruta
- Tabla de distancia al destino.

Cuando el tamaño de la red aumenta, el tamaño de un mensaje de actualización puede consumir un considerable ancho de banda.

FSR permite reducir el tamaño del mensaje de estado de enlace, utilizando diferentes frecuencias para el envío de la información. Esta frecuencia depende de la distancia a la que se encuentre el nodo con respecto al centro del área de cobertura (Centro del ojo del Pez), es decir, las entradas correspondientes a los nodos más cercanos son propagadas con la frecuencia más alta. Como resultado de esto, ciertas entradas de la tabla de estado de enlaces no son consideradas en una actualización típica, lo que reduce considerablemente el tamaño del mensaje.. Como resultado, FSR es más útil para redes de gran tamaño donde la movilidad es alta y el ancho de banda es bajo ya que no genera excesiva sobrecarga.

### 3.5. OLSR

Optimized Link State Routing protocol [2]. Es un protocolo proactivo basado en el estado de enlace. Utiliza dos tipos de paquetes de control; mensajes “hello” y “TC (Topology Control)”. Los mensajes “hello” son usados para construir el vecindario de un nodo y a la vez para obtener los “multipoint relays”, concepto que explicaremos más adelante.

Los mensajes “hello” se envía en modo broadcast a los nodos a un salto de distancia mientras que los TC son enviados a toda la red. Los TC emitidos por un nodo contienen la lista de sus vecinos. OLSR utiliza periódicos broadcast de paquetes “hello” para obtener posibles cambios en el vecindario y verificar la bidireccionalidad de los enlaces. Estos paquetes contienen el estado de los enlaces del nodo con el

resto de los nodos del vecindario. Este estado puede ser simétrico, asimétrico o multipoint relay.

Multipoint relay es un estado especial que permite la optimización de broadcast. Para conseguir un broadcast completo es suficiente que el paquete sea reenviado un número conveniente de veces. Se debe conseguir un subconjunto, al que llamaremos multipoint relays, de tal forma que todos los vecinos a dos saltos reciban el paquete. Se puede demostrar por inducción que si esta premisa se cumple se consigue un broadcast completo.

Los paquetes TC contienen la lista de los multipoint relays del nodo origen. Estos paquetes son enviados mediante broadcast con la particularidad que solo los multipoint relays los retransmiten. Se utilizan números de secuencia para evitar bucles. Otro campo es usado para distinguir entre varios paquetes TC cual es el más reciente. Aunque un nodo no reenvíe todo su vecindario en los paquetes TC, se puede demostrar que esta información es suficiente para construir una topología de la red y de esta manera obtener el camino más corto entre dos nodos.

### 3.6. TORA

Temporally-Ordered Routing Algorithm [8]. Este protocolo reactivo está basado en el concepto de Links Reversal. Es un algoritmo distribuido de encaminamiento, altamente adaptativo y libre de bucles. Fue propuesto para operar en redes altamente dinámicas. La clave de TORA es la generación de mensajes de control del protocolo en un pequeño conjunto de nodos cerca de la localización de un cambio topológico. El protocolo desarrolla 3 funciones básicas; la creación de rutas, el mantenimiento y su eliminación.

La fase de creación corresponde a la selección de una métrica para establecer un DAG (Directed Acyclic Graph) hacia el destino, en una red en la que, previamente los enlaces no tenían una dirección específica. Entonces, a los enlaces se les asigna la dirección (upstream o downstream) basados en las “alturas” relativas de los nodos vecinos. O sea, los paquetes viajan desde los nodos que tienen una mayor altura hacia aquellos con menor, lo que implica que el nodo origen (una vez que se establece la ruta) es el que tiene la altura mayor, y el nodo destino la menor.

El mantenimiento de rutas se refiere al hecho de adaptar la estructura de encaminamiento en respuesta a los cambios topológicos de la red.

Para llevar a cabo estas funciones básicas el protocolo define tres tipos de paquetes de control: query (QRY), update (UPD) y clear (CLR). Los paquetes QRY y UPD son utilizados en las fases de creación y mantenimiento de rutas como un mecanismo de petición QRY- respuesta- UPD. La fase de eliminación de rutas de TORA involucra esencialmente el broadcast de un “clear packet” (CLR) para eliminar las rutas inválidas. Este paquete CLR lo que hace es dar a los nodos una altura nula, haciendo que sus enlaces adyacentes queden sin dirección definida.

En TORA se pueden producir oscilaciones especialmente cuando múltiples conjuntos de nodos están detectando particiones, eliminando rutas y construyéndolas; aunque estas oscilaciones son temporales por lo que se termina convergiendo a una ruta. Además, este protocolo presenta la capacidad de desarrollar tareas de optimización de rutas, utilizando los paquetes conocidos como Optimización (OPT).

### 3.7. Descubrimiento de gateways

Para que un nodo de la red ad hoc sea capaz de dirigir tráfico hacia redes externas (Internet) debe saber que hay alguna pasarela que esté dispuesta a ofrecerle ese servicio. Para ello se siguen dos enfoques diferentes pero complementarios.

Los gateways pueden operar de forma proactiva inundando periódicamente mensajes en la red que anuncian su presencia. Esto consigue una baja latencia en las comunicaciones hacia Internet pero un gran consumo de recursos (overhead).

Por otra parte, los nodos pueden solicitar información de los gateways presentes en la red bajo demanda, es decir, solo cuando necesitan comunicarse con el exterior. Al contrario que en el enfoque proactivo, ahora se tiene una mayor latencia en las comunicaciones pero con un importante ahorro en ancho de banda.

También se puede utilizar un enfoque híbrido que mezcle ambos: el gateway opera proactivamente pero limitado solo a los nodos más cercanos, mientras que los alejados solicitan la información en el momento en el que la necesitan.

Cuando el nodo conoce los gateways que se encuentran disponibles en la red debe seleccionar uno de ellos para que el tráfico destinado a Internet pase por él. Es trabajo del mecanismo de interconexión diseñado el elegir el mejor gateway, así como cuáles son los criterios de selección empleados. Incluso se podrían utilizar varios gateways simultáneamente para balancear carga.

Cabe citar como ejemplos, los esquemas desarrollados por los siguientes autores: Wakikawa, Jelger, Cha y Singh.

## 4. Simulación de comunicaciones V2V

En este capítulo se muestran comparativas de rendimiento obtenidas mediante simulación de los más importantes protocolos unicast aplicados en escenarios realistas de comunicaciones entre vehículos.

### 4.1. Plataforma de simulación

La base de la plataforma es el simulador ns-2 (Network Simulator) dada la amplia aceptación internacional y ya que muchos de los grupos de trabajo que desarrollan protocolos para redes MANETs ofrecen las extensiones para este simulador de forma gratuita y desinteresada.

El código de los diferentes protocolos está desarrollado y cedido por el proyecto Monarch de la universidad de Carnegie Mellon, excepto OLSR y FSR desarrollados por la Universidad de Murcia [14] y Sourceforge [15] respectivamente.

Para crear los patrones de movimiento se han utilizado dos programas, también de código abierto, para obtener trazas de movilidad acordes con los movimientos de los vehículos que posteriormente usará el simulador ns-2: MOVE y SUMO.

La herramienta MOVE (MObility model generator for VEhicular networks) [9] nos permite crear mapas de carreteras urbanos o interurbanos (incluso importar mapas reales), flujos de tráfico controlados, horarios de recorridos, etc.

Además de la creación de mapas esta herramienta aporta un interfaz gráfico de alto nivel que permite seguir la creación de los estudios de simulación de forma sencilla manejando por debajo programas como el simulador de red (ns-2) y el simulador de vehículos (SUMO)

SUMO (Simulation of Urban Mobility) [10] es un paquete de simulación de tráfico vial de código abierto. Esta herramienta permite simular tráfico rodado con gran precisión, permitiendo desplegar la mayoría de los elementos que componen una vía, como semáforos, stops, carreteras de varios carriles, rotondas y así comprobar el comportamiento de los vehículos para su posterior optimización.

Es la herramienta encargada de generar el patrón de movimiento de los vehículos en las diferentes topologías para poder ser usado por el simulador.

Tras la creación de las carreteras y los flujos de tráfico se definen las conexiones entre vehículos y se simula. Como resultado de esta simulación se obtienen unas trazas en un formato concreto. Para el análisis de estas trazas y la obtención de indicadores para las comparativas se ha utilizado un “parser” desarrollado en JAVA a tal efecto y el programa de código abierto Tracegraph. Veamos este proceso en su conjunto en la figura 1.

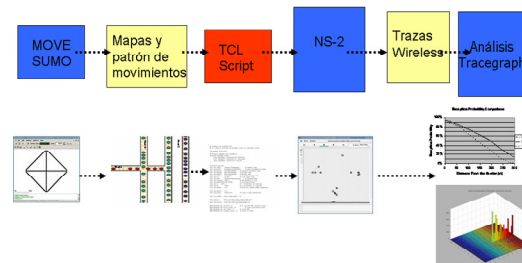


Figura 1. Procesos en la simulación

### 4.2. Escenarios

Las características de los entornos donde se llevarán a cabo los estudios son las siguientes:

Circuito urbano:

- De forma rectangular, con dimensiones típicas de vías urbanas; 900 x 500 metros.
- Un sentido de circulación con dos carriles

- Velocidades absolutas de los vehículos entre 50 y 80Km/h.
- Velocidades relativas entre 0 y 40 Km/h
- Curvas cerradas (90 grados)
- Para este circuito se crean tres densidades de tráfico; alta, media y baja correspondientes a los siguientes períodos de entrada de vehículos en el circuito: 10, 15 y 20.

Las características de los flujos de tráfico se muestran en la siguiente tabla, las unidades están en el sistema métrico internacional.

Tabla 1. Flujos de tráfico en circuito urbano

Carril	Aceleración	Deceleración	Velocidad Máxima
Interior	2	3	25
Exterior	1	2	15

Autopista:

- Tres kilómetros de recorrido
- Dos sentidos de circulación próximos entre sí, con dos carriles por sentido
- Velocidades absolutas entre 100 y 120Km/h.
- Velocidades relativas de los vehículos entre 0 y 40 Km/h, salvo en sentidos contrarios que llegan hasta los 240 Km/h
- Tramos muy uniformes, sin fuertes pendientes y con radios de curvatura muy elevados. Se ha aproximado a una línea recta.
- Para la autopista se crean tres densidades de tráfico; alta, media y baja correspondientes a los siguientes períodos de creación respectivamente: 5, 10 y 15. Se observa que los periodos de creación de vehículos son menores que en el circuito urbano, esto es necesario porque si el periodo es muy alto los vehículos que circulan por el carril rápido no se comunican entre sí

Las características de los flujos de tráfico se muestran en la siguiente tabla, las unidades están en el sistema métrico internacional.

Tabla 2. Flujos de tráfico en autopista

Carril	Aceleración	Deceleración	Velocidad Máxima
Interior	2	3	35
Exterior	1	2	25

El rango de transmisión por defecto son 250m mientras que la detección de portadora y el rango de la interferencia son 550m.

Para cada topología se elegirán dos nodos que recorran el circuito a diferentes velocidades (para ello se visualiza la traza con el animador nam) y se creará una conexión entre ellos, primero UDP y luego TCP.

Se ha elegido cbr como aplicación UDP, ya que parece lógico aproximar el tráfico generado a una velocidad constante en el tiempo. Para elegir la

aplicación TCP, aunque no parece un punto crítico de la simulación, se ha pensado en FTP.

Se podrían hacer más estudios comparativos, por ejemplo, variando la velocidad de los vehículos o introduciendo mayor número de conexiones en la MANET sucesivamente pero consideramos que estos escenarios son suficientemente representativos para nuestro caso de estudio.

Es importante estudiar con detenimiento el escenario a simular antes de llevar a cabo el trabajo. Al simular conexiones entre dos nodos hay que asegurarse que esos nodos tienen las mismas posiciones relativas en los escenarios con diferentes flujos de tráfico y diferentes protocolos. Si en cada escenario escogiésemos dos nodos al azar el resultado también sería aleatorio ya que puede que en uno los vehículos estén tan alejados que no se vean ni siquiera a través de la MANET y en otro estén durante todo el tiempo tan cerca que la conexión sea directa llegando al 100% de éxito en paquetes transmitidos.

Para esto se han realizado unas pruebas previas de los diferentes escenarios y sus flujos de tráfico y gracias al animador gráfico nam podemos ver los esquemas de movilidad. Se observa que los nodos 0 y 1 son los primeros en aparecer por cada carril y que al mantener el mismo esquema de velocidades en todos los escenarios solo varía el número de vehículos que hay entre ellos.

Como parámetros indicadores se han elegido:

- Porcentaje de éxito de paquetes. Indica en que grado es capaz la red de hacer llegar los paquetes a su destino final
- Retardo medio. Muestra el promedio de los tiempos que tardan los diferentes paquetes en cubrir la conexión extremo a extremo.
- Overhead. Es un indicador de la carga que los diferentes protocolos aportan a la red con sus procesos de búsqueda y mantenimientos de rutas.
- Throughput. Solo aplicable en TCP, este indicador muestra que protocolos son capaces de enviar mayor cantidad de información.

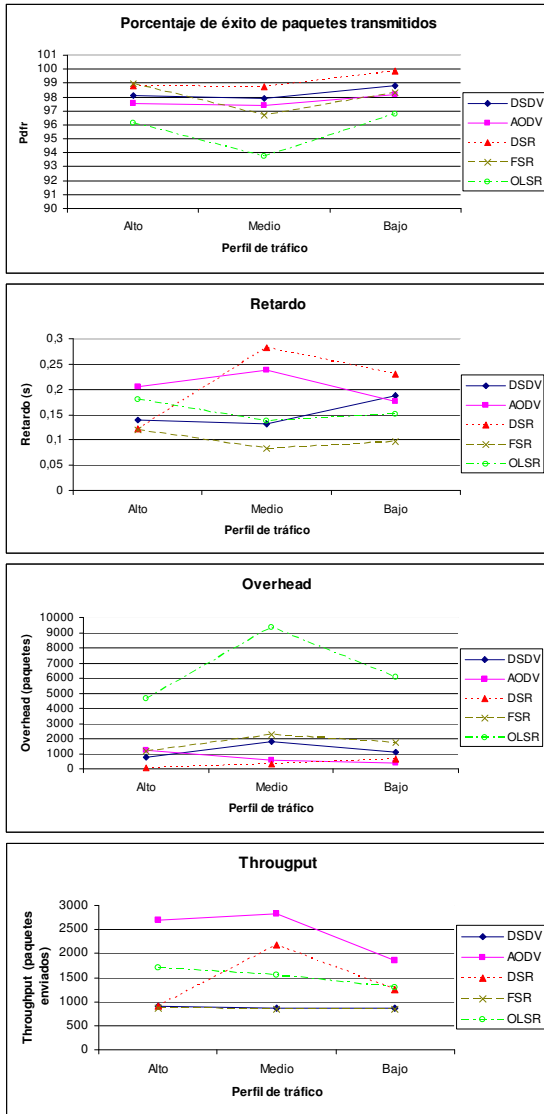
Nota: No se ha conseguido el correcto funcionamiento del protocolo TORA en la actual versión de ns-2 por lo que no presentan estudios comparativos de dicho protocolo. Aún así, varios estudios previos [11] indican que este protocolo presenta el peor comportamiento en estos escenarios con gran movilidad de nodos.

### 4.3. Comparativas de rendimiento en circuito urbano

En este estudio se pretende comparar los protocolos unicast Ad-hoc con diferentes perfiles de tráfico en el circuito urbano, para ello se establecerán dos comparativas, una conexión FTP sobre TCP y otra CBR sobre UDP modificándose las densidades de tráfico para ambos casos.

Ambas conexiones (tanto TCP como UDP) se producen desde el instante 20 hasta el 100 entre el nodo 0 y el nodo 2.

### 4.3.1. Conexión TCP en circuito urbano

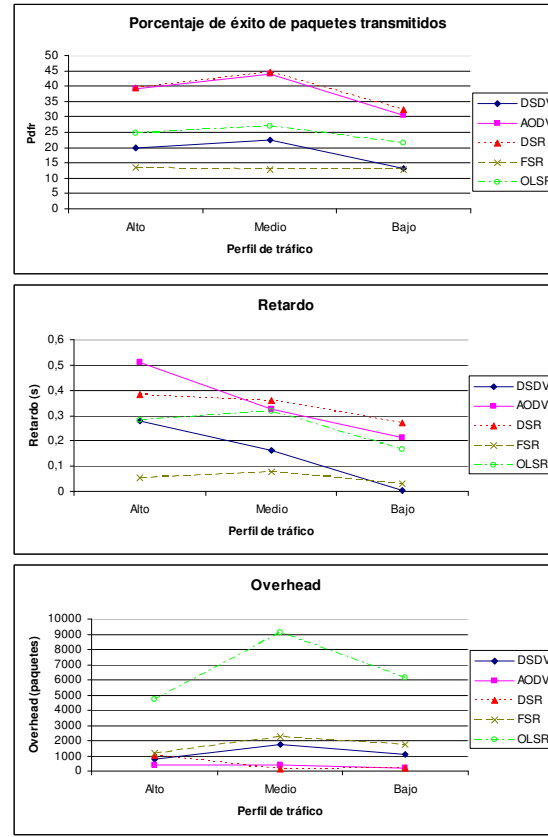


El indicador throughput es, quizás, el más importante ya que indica que protocolo ha sido capaz de enviar mayor cantidad de información y el resto de indicadores deberán ser estudiados con ese dato muy en cuenta. Se observa que para el circuito definido aparece un máximo local de rendimiento con el perfil de tráfico medio, con el que la mayoría de protocolos consiguen enviar mayor cantidad de información. Los protocolos reactivos ofrecen las mejores prestaciones.

De la gráfica de throughput se observa un claro vencedor en el protocolo AODV, que consigue enviar bastante más información que DSR, sobre todo con densidades altas aunque este último presente mejores porcentajes de éxito.

En la comparativa del retardo se observa algo inverso al throughput. Los protocolos que consiguen enviar mayor cantidad de información presentan retardos mayores.

### 4.3.2. Conexión UDP en circuito urbano



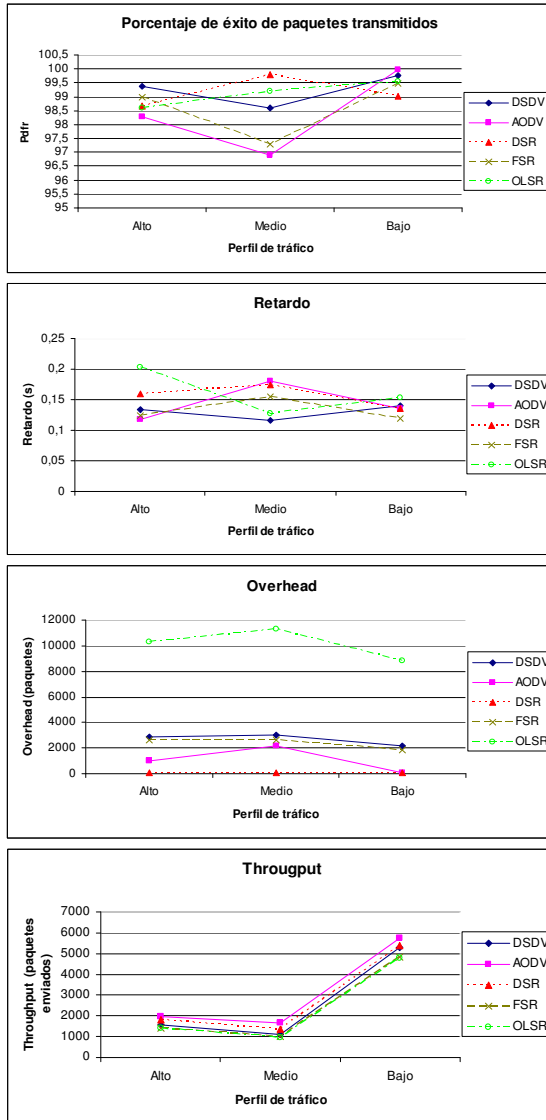
Observando las gráficas se concluye que existe un comportamiento óptimo en el perfil medio. Esto se deduce ya que nos encontramos un máximo local en el porcentaje de paquetes transmitidos para todos los protocolos. También se observa que los protocolos reactivos presentan mayor porcentaje de éxito y menores retardo y overhead. Estos resultados coinciden con lo esperado ya que en este tipo de redes con cambios rápidos de topología las rutas de los protocolos proactivos se quedan obsoletas rápidamente.

En la comparativa del retardo se observa una disminución importante con perfiles de tráfico bajo. Esto es así ya que al disminuir la densidad de nodos entre emisor y receptor no hay comunicación cuando la distancia es grande, por lo tanto hay menor éxito de paquetes pero los que llegan lo hacen con menor retardo, disminuyendo el promedio

### 4.4. Comparativas de rendimiento en autopista

Este estudio es equivalente al del circuito urbano pero con el escenario típico de autopista. Ambas conexiones (tanto TCP como UDP) se producen desde el instante 10 hasta el 90 entre el nodo 0 y el nodo 2.

#### 4.4.1. Conexión TCP en autopista

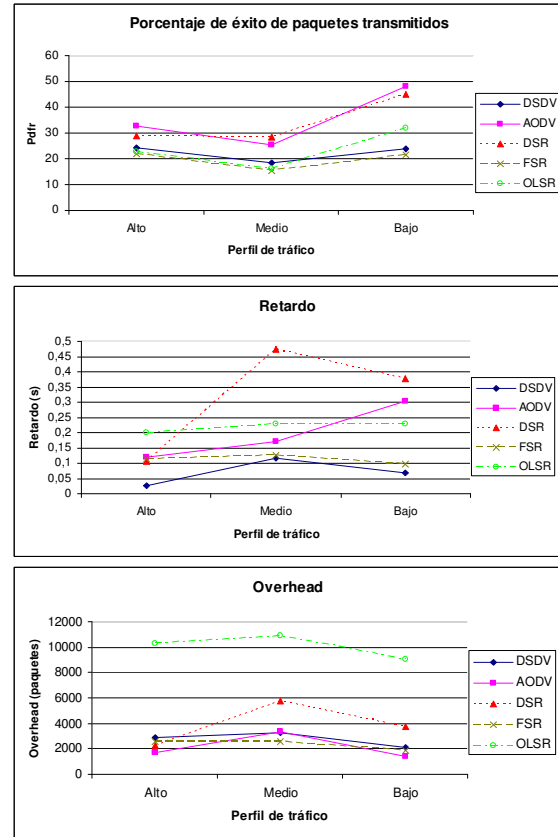


Se observa que los mejores valores de transferencia de datos TCP en autopista se dan con el perfil de tráfico bajo dónde todos los protocolos aumentan considerablemente su rendimiento. Una vez más, AODV primero y FSR después son los mejores en este estudio.

De la gráfica de throughput se observa que todos los protocolos siguen la misma línea con una diferencia no muy grande entre todos ellos, esto significa que la mayor parte de los datos transmitidos lo han hecho en circunstancias en las que todos los protocolos funcionan igual, probablemente con el mismo número de nodos intermedios.

En el retardo se observa que los protocolos reactivos tienen un máximo para el perfil de tráfico medio, esto significa que consiguen enviar información por una ruta que tarda más tiempo en llegar al destino pero lo alcanza, aumentando en promedio este indicador.

#### 4.4.2. Conexión UDP en autopista



Se concluye que para la autopista y los perfiles de tráfico UDP definidos, se obtienen buenos comportamientos con densidad de tráfico bajas, dónde el porcentaje de éxito se acerca al 50% en el caso de AODV. Este protocolo se presenta como claro vencedor en el estudio, seguido de DSR.

En la comparativa del retardo se observa que AODV presenta unos retardos aceptables entre 0,1 y 0,3, inferiores incluso que los de algunos protocolos proactivos. También se ve a simple vista unos valores bastante elevados de retardo de DSR, sobre todo para densidades de tráfico medias. Esto puede ser debido a que este protocolo consiga enviar tráfico utilizando una ruta con elevado número de saltos, aumentando la media de este indicador considerablemente.

Al igual que pasaba en el circuito urbano los protocolos proactivos mantienen un overhead casi constante al variar la densidad de nodos mientras que los reactivos son más sensibles a esta variación.

## 5. Conclusiones

Se han explicado los aspectos fundamentales implicados en las comunicaciones car2car, detallando la tecnología 802.11p y los protocolos de encaminamiento más importantes.

La principal conclusión de los resultados de las simulaciones es que en estos entornos de topología muy variable, los protocolos reactivos AODV y DSR tienen mayores prestaciones que los proactivos.

Dado que AODV presenta en la mayoría de las topologías, las mejores tasas de transferencia, bajos retardos y no genera gran cantidad de paquetes de control para la creación y mantenimiento de rutas (overhead) se concluye que es el más eficiente para estas comunicaciones en general. A continuación se presenta un análisis más detallado de la comparativa de los indicadores en las diferentes topologías:

En todos los estudios se observa que hay un perfil de tráfico óptimo por encima del cual, un aumento de nodos implica peor comportamiento por saturación de la red y por debajo disminuye el número de rutas para llegar al destino en ciertos instantes de tiempo.

Los protocolos reactivos son los que mejor throughput presentan para comunicaciones TCP y los que mejor porcentaje de éxito obtienen al enviar datos UDP, tanto para circuitos urbanos como para autopistas. Se observa que en los mejores casos (densidad de tráfico baja en autopistas) AODV alcanza un porcentaje de éxito cercano al 50% en UDP y un throughput de 6000 paquetes en TCP. Estos valores en los 80 segundos de simulación equivalen a tasas medias de 30kbps para UDP y 70kbps para TCP.

Se ha comprobado como los retardos, en muchas ocasiones, son inversamente proporcionales a la cantidad de información transmitida ya que el conseguir mandar información por rutas largas implica subir el promedio del retardo para esos estudios. Aún así, los retardos de AODV se mantienen entre 100 y 200 ms para casi todas las topologías.

De las comparativas de overhead se extrae que los protocolos proactivos presentan una mayor carga a la red siendo casi constante al modificar los perfiles de tráfico mientras que los reactivos introducen menos carga y son más sensibles a la densidad de nodos. Esta sensibilidad hace que el porcentaje de paquetes de control vaya del 2 % hasta el 30% en los peores. Cabe destacar el buen comportamiento en este sentido de DSR en comunicaciones TCP.

En el escenario de la autopista se comprueba gracias al uso de tracegraph que para la mayoría de los protocolos la velocidad de los vehículos que circulan en sentido contrario es demasiado alta para que intervengan en el encaminamiento de paquetes de una conexión en un sentido. Como excepción cabe citar al protocolo AODV que, aunque en pequeña medida, es capaz de encaminar parte del tráfico a través de vehículos del sentido contrario.

## Referencias

- [1] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. RFC 3561, Julio 2003.
- [2] T. Clausen and P. Jacquet. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). RFC 3626, Octubre 2003.
- [3] Charles Perkins and Pravin Bhagwat. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers. In ACM SIGCOMM'94 Conference on

Communications Architectures, Protocols and Applications

- [4] David B. Johnson, David A. Maltz, and Yih-Chun Hu. The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR). Internet Draft "draft-ietf-manet-dsr-10". Julio 2004
- [5] Fisheye State Routing Protocol for Ad Hoc Networks. Julio 2002.draft-ietf-manet-fsr-03.txt
- [6] Guangyu Pei, Mario Gerla y Tsu-Wei Chen. "Fisheye State Routing in Mobile Ad Hoc Networks" 2001.
- [7] T. Clausen and P. Jacquet. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). RFC 3626, Octubre 2003.
- [8] V. Park and S. Corson. Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA) Version 1. Functional Specification. Internet Draft "draft-ietf-manet-tora-spec-04". Julio 2001.
- [9] MOVE. School of Computer Science and Engineering. New South Wales. Australia <http://www.cse.unsw.edu.au/~klan/move>
- [10] SUMO. <http://sumo.sourceforge.net>
- [11] Evaluation of Routing Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks in Typical Road Traffic Scenarios. Sven Jaap and Marc Bechler and Lars Wolf. Technische Universität Braunschweig Institute of Operating Systems and Computer Networks. Germany
- [12] IEEE P802.11 - TASK GROUP P. [http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tpg\\_update.htm](http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tpg_update.htm)
- [13] Servicios de Valor Añadido en Redes Móviles Ad-hoc. Iván Vidal, Carlos García, Ignacio Soto, José Ignacio Moreno. Departamento de Ingeniería Telemática. Universidad Carlos III de Madrid
- [14] Grupo ANTS del departamento de Ingeniería de la Información y las Comunicaciones. Universidad de Murcia
- [15] FSR Implementation <http://fsr-routing.sourceforge.net/>

## Reseña curricular

Iván Lequerica es Licenciado en Ciencias Físicas (2000) e Ingeniero en Electrónica (2001) por la Universidad del País Vasco (UPV-EHU). En 2006 obtiene la suficiencia investigadora en el programa de doctorado de Telemática en la ETSIT-UPM.

Comenzando su trayectoria profesional en Enero de 2001, ha trabajado en Vodafone y en el centro tecnológico Labein-Tecnalia. Desde Octubre de 2003 es Investigador en Telefónica I+D centrandó su actividad en redes inalámbricas y servicios. Actualmente enmarcado en la división "Automóvil conectado", participa en varios proyectos de investigación nacionales y europeos.