

Detección Distribuida de la Conectividad en Redes Ad-hoc de Comunicaciones Vehiculares

Michele Rondinone y Javier Gozávez

Ubiquitous Wireless Communications Research Laboratory

Uwicore, <http://www.uwicore.umh.es>

Universidad Miguel Hernández de Elche

Avenida de la Universidad, s/n 03202 Elche

mrondinone@umh.es, j.gozalvez@umh.es

Resumen- Estudios recientes han demostrado que las prestaciones de los protocolos de enrutamiento en redes vehiculares pueden mejorarse mediante la utilización de información dinámica sobre las condiciones de tráfico. Dicha información puede emplearse para seleccionar los caminos de enrutamiento o nodos retransmisores más apropiados. Sin embargo, la mayoría de las técnicas de estimación de las condiciones de tráfico causan una importante sobrecarga en el canal radio lo cual puede comprometer su futura viabilidad. En este contexto, este artículo introduce y evalúa DiRCoD, una novedosa técnica para estimar la conectividad *multi-hop* de segmentos de carretera que permite obtener la capacidad de estos segmentos para enrutar de manera fiable paquetes de datos. Como se demostrará en el artículo, esta técnica es capaz de proporcionar información de conectividad con gran periodicidad, sin incurrir en un elevado incremento de la sobrecarga de señalización y con un bajo coste de implementación.

I. INTRODUCCIÓN

Las redes vehiculares cooperativas son actualmente objeto de estudio en numerosos trabajos de investigación que proponen novedosos servicios y aplicaciones ITS (*Intelligent Transportation Systems*) con el objetivo de proporcionar una mayor seguridad y eficiencia vial. Para ello, se han planteado sistemas cooperativos que permiten a los vehículos comunicarse directamente entre sí (comunicaciones *Vehicle-to-Vehicle* o V2V), o con elementos de infraestructura (comunicaciones *Vehicle-to-infrastructure*). A través del intercambio de información dinámico y cooperativo entre vehículos, los conductores obtienen una información sobre el estado de la carretera y, más en general, del tráfico de forma anticipada y más allá de su campo visual. Además, los sistemas vehiculares cooperativos permiten el establecimiento de redes ad-hoc vehiculares (*Vehicular Ad-hoc Networks* o VANETs) que permiten el intercambio de datos entre vehículos, aunque no se encuentren dentro de su rango de comunicación. Para ello, se establecen comunicaciones *multi-hop* entre origen y destino empleando las retransmisiones de nodos intermedios que pueden ser vehículos o estaciones base fijas de apoyo llamadas *roadside units*. Un ejemplo de utilización de VANETs podría ser la notificación de un atasco a vehículos que se estén acercando

al área congestionada, de forma que puedan modificar sus rutas. La eficiencia de las comunicaciones *multi-hop* para VANETs puede verse notablemente afectada por el diseño de los protocolos de enrutamiento empleados para permitir el encaminamiento de la información de forma correcta desde el nodo fuente al nodo destino mediante una adecuada selección de nodos retransmisores. El diseño de estos protocolos es significativamente complejo debido a la alta movilidad de los nodos vehiculares, y a las difíciles condiciones de propagación del medio inalámbrico. Estas condiciones se complican aún más en el caso de las comunicaciones V2V, donde la altura de las antenas transmisora y receptora es reducida, y en entornos urbanos, donde la presencia de obstáculos dificulta la propagación de la señal radio.

La mayoría de los protocolos de enrutamiento presentados en la literatura [1-10] utiliza la posición geográfica de los nodos para seleccionar los retransmisores. Entre estos protocolos, es importante destacar aquellos que seleccionan caminos de enrutamiento basándose en las condiciones actuales del tráfico en las carreteras teniendo en cuenta para ello la presencia potencial de nodos retransmisores. Los trabajos planteados anteriormente en la literatura para estimar estas condiciones de tráfico conllevan normalmente una alta sobrecarga de comunicaciones. En este contexto, este artículo presenta DiRCoD (*Distributed and Real Time Communications Road Connectivity Discovery mechanism*), un mecanismo distribuido que permite detectar la conectividad de las carreteras en tiempo real. Este mecanismo ha sido diseñado para mejorar el rendimiento de los protocolos de enrutamiento en redes vehiculares a través de la estimación dinámica de la capacidad de los segmentos de carretera para soportar retransmisiones *multi-hop* fiables. Como se mostrará, DiRCoD es capaz de estimar esta capacidad con una baja sobrecarga de comunicaciones y con un coste de implementación mínimo gracias al empleo de mensajes *broadcast* denominados *beacons*, los cuales han sido introducidos en los estándares de comunicaciones cooperativas vehiculares.

II. ESTADO DEL ARTE

Con el objetivo de mitigar la inestabilidad de las comunicaciones inalámbricas *multi-hop* en entornos

vehiculares, se han propuesto protocolos de enrutamiento que utilizan la posición geográfica de los nodos para seleccionar de manera dinámica el próximo nodo retransmisor. Por ejemplo, los protocolos GPSR (*Greedy Perimeter stateless Routing*) [1] y CBF (*Contention-Based Forwarding*) [2] adoptan el esquema denominado “*greedy forwarding*”, el cual selecciona como retransmisores los nodos que se encuentran más cerca del nodo o área de destino. Sin embargo, las técnicas de enrutamiento *greedy forwarding* pueden presentar el problema del “máximo local”. El máximo local hace referencia a la situación en la que un paquete de datos que está siendo enrutado mediante *greedy forwarding* alcanza un nodo que no tiene vecinos más cerca del destino que él mismo. En este caso, dado que el retransmisor actual (o máximo local) es el nodo más cercano al destino, no puede continuar retransmitiendo el paquete. Cuando se presenta esta situación, el paquete de datos se descarta, salvo que se empleen técnicas para seleccionar rutas alternativas hacia el destino. Por otra parte, distintos trabajos han demostrado que la presencia de edificios en entornos urbanos puede afectar significativamente al funcionamiento de estos protocolos, al ocultar el mejor nodo retransmisor o al establecer múltiples rutas hacia el destino de manera ineficiente [3]. Algunos protocolos tales como Spatially Aware Routing (SAR) [4] o Geographic Source Routing (GSR) [5] emplean mapas digitales para intentar resolver los problemas mencionados anteriormente, enrutando los paquetes mediante *greedy forwarding*, pero usando caminos geográficos fijos que conectan el nodo fuente al destino a través un determinado número de intersecciones. La selección de estos caminos está basada en información estática de la red de carreteras (por ejemplo el camino más corto entre fuente y destino), o en datos estadísticos que no son continuamente actualizados. Por consiguiente, el camino seleccionado podría no ofrecer una adecuada conectividad de comunicaciones *multi-hop* que asegure la entrega de los paquetes desde la fuente al destino. Para superar algunas de estas limitaciones, recientemente han sido propuestos protocolos como VADD (*Vehicle-Assisted Data Delivery*) [6] y TBD (*Trajectory-Based Data Forwarding*) [7]. Estos protocolos seleccionan dinámicamente en cada intersección la ruta por la que encaminar los paquetes basándose en estadísticas de tráfico a largo plazo como por ejemplo el número medio de vehículos que circulan por una cierta calle. Aunque estos mecanismos puedan resultar en rutas *multi-hop* estables en término medio, no son capaces de proporcionar instantáneamente caminos de enrutamiento que aseguren conectividad *multi-hop* en un momento dado.

Nuevas propuestas tales como LOUVRE (*Landmark Overlays for Urban Vehicular Routing Environments*) [8] y RBVT (*Road-Based using Vehicular Traffic Routing*) [9] tienen como objetivo seleccionar caminos de enrutamiento que garanticen la conectividad entre los nodos, empleando para ello estimaciones de tráfico como por ejemplo la densidad de vehículos en una calle. Ambos enfoques pueden ser considerados como protocolos proactivos de enrutamiento basados en la posición donde los nodos se intercambian periódicamente mensajes para disponer de un mapa de conectividad de la red de carreteras. Cuando se desea enrutar un paquete, esta información es utilizada por los vehículos para calcular el camino más conveniente que asegure la conectividad de extremo a extremo y entregar de forma fiable

los paquetes. Se ha demostrado que este tipo de protocolos obtiene buenas prestaciones en términos de ratio de paquetes entregados. Sin embargo, a fin de obtener un conocimiento actualizado en todo momento de la conectividad de la red de carreteras, estos protocolos incurren en una considerable sobrecarga de comunicaciones, debido al intercambio periódico de mensajes entre vehículos.

GyTAR (*Improved Greedy Traffic Aware Routing protocol*) [10] es otro protocolo de enrutamiento para redes vehiculares basado en un enfoque distinto al ofrecido por los mecanismos anteriores. Este protocolo computa de manera dinámica en cada intersección el camino de enrutamiento basándose en evaluaciones de la densidad de tráfico en tiempo real. Cada vez que un paquete llega a una intersección, GyTAR lo encamina (entre todas las rutas que parten de esta intersección) hacia la calle que más se acerca al destino y cuya densidad de tráfico estimada sea la más alta; a mayor densidad de tráfico, mayor será la probabilidad de que exista conectividad *multi-hop* de extremo a extremo. Para calcular la densidad de una calle y hacer llegar esta información a las intersecciones, se utiliza un algoritmo llamado IFTIS (*Infrastructure-Free Traffic Information System*) [11]. IFTIS es una técnica totalmente distribuida de estimación de la conectividad *multi-hop* en segmentos de carreteras que calcula dinámicamente la densidad de tráfico. Sin embargo, como será demostrado en la sección IV, IFTIS introduce una sobrecarga de señalización relativamente alta, que se compensa con una menor frecuencia de actualización de la información de tráfico. Aunque esta capacidad de compensación es muy interesante para controlar la sobrecarga, el resultado final puede afectar de alguna manera la capacidad de IFTIS de proporcionar información actualizada a protocolos de enrutamientos para VANETs que se basen en estos datos.

Con el fin de reducir la sobrecarga de comunicación y al mismo tiempo proporcionar información de conectividad *multi-hop* actualizada a los protocolos de enrutamiento, este artículo presenta la técnica DiRCoD. DiRCoD ha sido diseñado para asistir a los protocolos de enrutamiento en la selección del siguiente segmento de carretera por el que retransmitir los paquetes de datos, mediante la estimación directa de su conectividad *multi-hop*. En este contexto, existe conectividad en un segmento si existe un conjunto de vehículos que ofrezca la capacidad de retransmitir paquetes de un extremo a otro utilizando comunicaciones *multi-hop*. Como será explicado en las próximas secciones, el protocolo propuesto estima directamente la conectividad *multi-hop* de una calle generando una menor sobrecarga en comparación con los métodos que la evalúan calculando la densidad de tráfico. Además, esta estimación puede emplearse para evitar que los protocolos de enrutamiento escojan repetidamente las calles más densas para enrutar paquetes, lo cual aumenta la congestión en el canal de comunicaciones en estas calles. El diseño de protocolos de enrutamiento basados en la estimación directa de la conectividad *multi-hop* mejoraría la distribución espacial y el balanceo de la carga de comunicaciones. De hecho, estos protocolos permitirían el enrutamiento de paquetes por calles que ofrezcan conectividad *multi-hop*, aunque estas no presenten las densidades de tráfico más elevadas.

III. DiRCoD

A. Principio de funcionamiento

Como ha sido explicado, DiRCoD ha sido diseñado para proporcionar información sobre la conectividad *multi-hop* de segmentos de carreteras con el fin de asistir a los protocolos de enrutamiento en VANETs en la selección dinámica de los próximos caminos de enrutamiento. Para describir el mecanismo de DiRCoD, este trabajo considera segmentos de carreteras delimitados por dos intersecciones como muestra la Figura 1. Supongamos que un vehículo en la intersección I_s tenga que transmitir un mensaje hacia un área geográfica X . A diferencia de los protocolos que determinan los caminos de enrutamiento de origen a destino sin considerar las condiciones dinámicas de tráfico o de conectividad, este trabajo se centra en esquemas que, como GyTAR, intentan seleccionar las calles que asegurarían la probabilidad más alta de retransmitir los paquetes de extremo a extremo, estimando esta probabilidad en términos de conectividad *multi-hop*. Considerando el ejemplo ilustrado en Figura 1, cuando un paquete fuente alcanza la intersección I_1 , el nodo receptor debería instantáneamente decidir si enrutar el paquete hacia I_2 , I_3 o I_4 . Para contribuir a la decisión de enrutamiento, DiRCoD proporciona una medida de la conectividad *multi-hop*, es decir de la disponibilidad de vehículos capaces de retransmitir el paquete por medio de transmisiones *multi-hop* de I_1 a I_x para cada uno de los tres posibles caminos (I_1 - I_2 , I_1 - I_3 , y I_1 - I_4). Una innovación clave de DiRCoD es que este mecanismo utiliza el mensaje *broadcast* llamado *beacon* o *Connectivity Awareness Message* (CAM) para estimar la conectividad *multi-hop* de cada segmento de carretera. Es importante clarificar que DiRCoD ha sido diseñado considerando las actuales convenciones europeas que armonizan la arquitectura de comunicaciones ITS [12]. Estas convenciones establecen que los mensajes CAM se transmitan en el canal de control (*Control Channel* o CCH) y que las comunicaciones *multi-hop* se transmitan en el primer canal de servicio (*Service Channel 1* o SCH1)¹. Para estimar la conectividad *multi-hop* de una calle, DiRCoD la divide en varias secciones con una longitud igual al rango de comunicación de los vehículos en el SCH1². El mecanismo define también la distancia virtual

de una cierta intersección I_x como el número de secciones de la calle, o saltos (*hops*), que separan el vehículo más cercano de I_x . El ejemplo de la Figura 2a) representa una calle con conectividad *multi-hop* completa dado que hay suficientes vehículos para retransmitir paquetes de un extremo (I_1) a otro (I_2). En este caso, la distancia virtual es igual a 0 saltos. Al contrario, la Figura 2b) representa una calle con conectividad *multi-hop* parcial y una distancia virtual de 2 saltos.

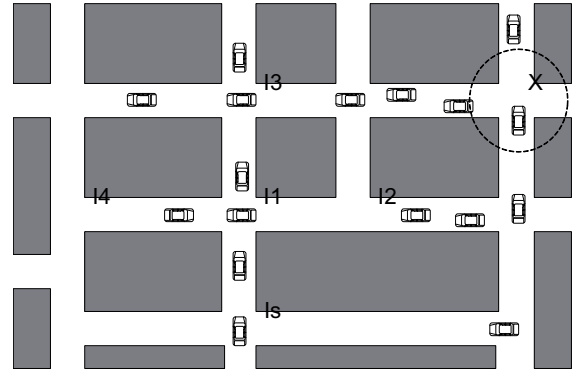


Figura 1. Escenario de aplicación de protocolos de enrutamiento *multi-hop* en VANETs.

Para estimar la conectividad *multi-hop* o la distancia virtual de una intersección dada, DiRCoD introduce un campo de conectividad (o *connectivity field*) que es agregado a los CAMs transmitidos por los vehículos. El *connectivity field* inicialmente indica la sección de la calle en que el vehículo se encuentra en el momento de la transmisión del CAM. Sin embargo, si un vehículo es consciente de la presencia de otros vehículos más cercanos que él a la intersección destino (I_2) o situados en la intersección misma, el *connectivity field* indicará aquellas secciones o la intersección destino. Considerando el ejemplo de la Figura 2a), el vehículo F, en vez de agregar un '1' (su sección actual), agregará a su CAM un *connectivity field* igual a '0', ya que detecta la presencia de un vehículo en I_2 . De forma parecida, el vehículo B, pondría en principio un *connectivity field* igual a '2', pues está a dos saltos de I_2 . Sin embargo, al recibir desde F un CAM que incluye un *connectivity field* igual a '0', agregará este mismo valor en el *connectivity field* de su CAM. A través de un procedimiento de propagación secuencial (ver sección III.B), los vehículos que entran en la intersección I_1 recibirían desde el vehículo D un mensaje CAM con un *connectivity field* igual a '0', y por lo tanto serían informados de que la calle ofrece una conectividad *multi-hop* completa desde I_1 hasta I_2 . Al contrario, los vehículos que entran en I_1 en el ejemplo de la Figura 2b) recibirían del vehículo D un mensaje CAM con un *connectivity field* igual a '2', lo cual indicaría que esta calle sólo ofrece conectividad parcial: cuanto más alto sea el valor indicado en el *connectivity field* del CAM, menor será la conectividad *multi-hop* de la calle.

¹ Los mensajes CAM son utilizados por los vehículos para notificar periódicamente su presencia a los vecinos más cercanos.

² Diferentes rangos de comunicaciones pueden ser supuestos en el CCH y en los SCHs. En particular, la utilización de diferentes rangos de comunicaciones y el diseño de otras políticas de control de congestión del canal radio para el CCH es un área de investigación abierta. Esto es debido a la naturaleza de este canal, caracterizada por niveles altos de carga de comunicaciones. Al contrario, un rango de comunicaciones más alto puede ser supuesto para el SCH1, que sería el canal inicialmente utilizado para transmisiones *multi-hop*. Es importante destacar que, aunque la implementación actual de DiRCoD se basa en configuraciones estándar actuales, el mecanismo podría ser fácilmente modificado y adaptado a configuraciones diferentes.

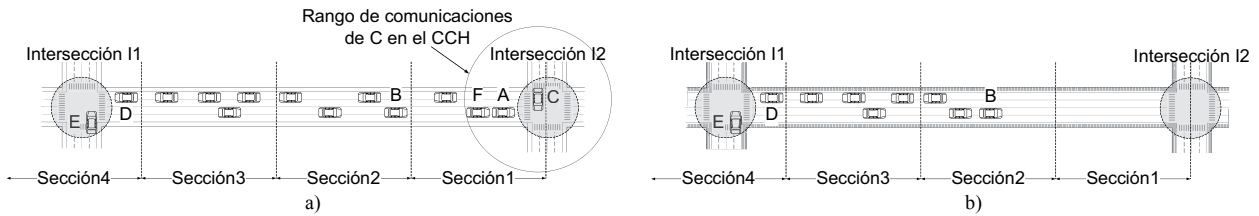


Figura 2. Segmento de carretera con conectividad *multi-hop* total (a), y con conectividad *multi-hop* parcial (b).

B. Aspectos de implementación

Para asegurar la escalabilidad de DiRCoD, varios aspectos de implementación tienen que ser considerados. En primer lugar, es importante limitar y controlar la generación de los *connectivity fields* por parte de los vehículos en las secciones de la calle. Para explicar cómo, se considera el escenario representado en la Figura 2a), donde el vehículo E, al entrar en la intersección I1, necesita una estimación de la conectividad *multi-hop* de la calle I1-I2, a fin de decidir si enrutar los paquetes que recibe por esta calle o por otras. La zona de intersección se define como un círculo cuyo centro coincide con el de la intersección y con un radio bastante pequeño para que los vehículos en su interior estén en condiciones de visibilidad radio directa con todas las calles que salen de la intersección. Sólo a los vehículos en la parte interior de la calle, excluyendo las dos intersecciones, se les permite generar un *connectivity field*. Antes de hacer el *broadcast* de un mensaje CAM normal, cada vehículo controla en su tabla de vecinos si aparecen nodos que estén más cerca que él a la intersección I2. Si no se encuentra ningún vehículo con estas características, se agrega al mensaje CAM un *connectivity field* que indica la sección de la calle donde el vehículo está actualmente. Este es el caso del vehículo B en la Figura 2b). Al contrario, si por lo menos un vehículo más cercano a I2 se encuentra en la tabla de vecinos, ningún *connectivity field* será agregado. Esto se debe a que el vehículo detecta que la generación de una información de conectividad según el mecanismo de DiRCoD se realiza en vehículos que están más cerca de la intersección I2 que él mismo, y por lo tanto solo debe esperar recibirla y retransmitirla hacia I1. El *connectivity field* es también generado y agregado a mensajes CAM por los vehículos que reciben un CAM desde nodos ubicados en la intersección I2. En este caso el *connectivity field* es igual a '0', ya que la intersección I2 puede ser alcanzada por medio de comunicaciones *multi-hop*. En algunos casos, puede pasar que nodos vecinos quieran generar un *connectivity field* con la misma información en el mismo instante. Una situación de este tipo es mostrada en la Figura 2a) donde los vehículos F y A reciben ambos un mensaje CAM desde el vehículo C ubicado en I2. Esto debería evitarse porque resultaría en información redundante que podría comprometer la escalabilidad de DiRCoD. Con este propósito, cada vehículo, al recibir un *connectivity field* (o un mensaje CAM normal desde un vehículo ubicado en I2), activa un temporizador cuya duración es proporcional a su distancia a la intersección I1 (cuanto más pequeña sea esta distancia, más breve es el temporizador). El vehículo cuyo temporizador termina primero es el que antes transmite el CAM con el *connectivity field* añadido. El resto de vehículos que tienen el temporizador activo, al recibir de este vehículo el mensaje

CAM con el *connectivity field* añadido, cancelan la inclusión del *connectivity field* en sus mensajes CAM. Otra situación que tiene que ser cuidadosamente controlada es cuando hay dos o más vehículos en la intersección I2 al mismo tiempo. En este caso, un vehículo en la Sección 1 recibiría varios mensajes CAM desde varios nodos ubicados en la intersección. Según lo explicado anteriormente, la recepción de mensajes CAM por los vehículos situados en I2 haría que los vehículos en la Sección 1 generaran un *connectivity field* y lo añadirían a su propio CAM. Sin embargo, esto implicaría la generación de información de conectividad redundante en intervalos temporales muy breves. A fin de evitar esta redundancia, DiRCoD define un segundo temporizador de x segundos. Los vehículos en la Sección 1 deben esperar hasta la conclusión de este temporizador antes de volver a generar otro *connectivity field*, en caso necesario. Si se reciben muchos mensajes CAM desde vehículos diferentes situados en I2, sólo un *connectivity field* será generado y agregado a un CAM por los vehículos ubicados en la Sección 1.

Para terminar con la descripción de DiRCoD, es importante describir el contenido del *connectivity field*. El tamaño de este campo se ha limitado a sólo un octeto (*byte*). El primer bit se utiliza para distinguir si la estimación de la conectividad se refiere a la dirección desde I1 a I2 o desde I2 a I1. Los restantes 7 bits cuantifican la distancia virtual que separa el nodo más cercano a la intersección destino (I2 en la Figura 2) en términos de saltos necesarios en el SCH1 para alcanzar esta intersección¹. Finalmente, la identificación de la calle a la que se refiere la información de conectividad *multi-hop* no requiere bits adicionales. De hecho, esta información puede ser deducida a partir de la posición del vehículo que transmite el *connectivity field* hacia la intersección I1 (esta posición siempre está presente en los mensajes CAM) y de la utilización de mapas digitales.

IV. EVALUACIÓN DE LAS PRESTACIONES

A. IFTIS

En este trabajo, la técnica IFTIS ha sido implementada como banco de prueba sobre el que comparar las prestaciones y la sobrecarga de DiRCoD.

En IFTIS [11], las calles son divididas en celdas uniformemente distribuidas y de radio igual al rango de comunicaciones de los vehículos. Las celdas de IFTIS son círculos situados uno a lado del otro y parcialmente superpuestos en su borde de tal manera que la distancia entre

¹ Considerando un pequeño rango de comunicaciones de 100m, 7 bits son suficientes para representar la distancia virtual en calles de hasta 12.7 km de longitud.

los centros de celdas adyacentes sea aproximadamente igual a dos veces el rango de comunicación. Siguiendo el ejemplo de la Figura 2, los vehículos que implementan IFTIS generan y transmiten un *cell density packet* (CDP) al llegar a la intersección I2. Este paquete es transmitido después hacia I1 utilizando transmisiones sucesivas *multi-hop geounicast* de un centro de celda a otro. Concretamente, estas transmisiones sucesivas se dirigen al vehículo que esté más cerca del centro de la próxima celda en cada una de las celdas a lo largo de la calle desde I2 hasta I1. Los vehículos que reciban el paquete CDP cerca del centro de una celda, cuentan el número de sus vecinos actuales (utilizando los CAMs recibidos) y guardan este valor en el CDP antes de que el paquete sea retransmitido hacia la próxima celda. De esta manera, el paquete CDP es actualizado cada vez con el número de vehículos presentes en las diferentes celdas de la calle. Cuando al final llega a la intersección I1, el CDP es transmitido de forma *geobroadcast* para que los vehículos que entren en la intersección I1 reciban una estimación de la densidad de esta calle y puedan decidir si enrutar los paquetes *multi-hop* por ella o por otras calles. Para garantizar la escalabilidad, sólo aquellos vehículos que han actualizado el CDP anteriormente generarán un nuevo CDP al llegar a la intersección I2. Según lo explicado en la sección III, dado que el CDP se transmite en modo *multi-hop*, debe utilizar el canal SCH1. Sin embargo, las orientaciones más recientes de la ETSI acerca de la gestión de los canales de comunicaciones [13] establecen que cada transmisión en cada uno de los SCHs tiene que ser previamente anunciada en el CCH por medio de *service advertisements* (SAs). Esto implica que por cada transmisión de un CDP, un SA preliminar debe ser transmitido en el CCH. Además, con el fin de garantizar que ningún vehículo en la intersección I1 pierda el *broadcast* final del CDP, la implementación de IFTIS considerada en este trabajo ha asumido que la transmisión *geobroadcast* del CDP en la intersección I1 se efectúe en el CCH. Dado que el CDP transporta información de cada una de las celdas en que está dividida la calle, su *payload* es proporcional al número de las celdas, que a su vez depende del rango de comunicaciones. La porción del CDP dedicada a cada celda consta de tres subcampos: el identificador de la celda, su posición y su densidad. Sin embargo, el *payload* del CDP incluye una sección de tamaño fijo, que lleva información sobre el identificador de la calle y el tiempo de generación del mensaje. Para la porción fija del *payload* del CDP, este trabajo supone la utilización de ocho octetos para representar el identificador de la calle y de cuatro octetos para el tiempo de generación del paquete. Ocho octetos adicionales se han añadido para indicar las coordenadas geográficas de la intersección I1, ya que ésta es el último destino hacia al cual el CDP tiene que dirigirse después de haber atravesado todas las celdas de la calle. Para la parte del *payload* dedicada a cada celda, se han considerado ocho octetos para representar las coordenadas de su centro (posición de la celda), seis bits para su identificador, y diez bits para su densidad¹. A fin de calcular el tamaño total de los

¹ Estos últimos dos valores han sido escogidos para tener en cuenta los escenarios más pesimistas. De hecho, utilizando un

paquetes CDP incluyendo cabeceras de capa MAC y NET/TR, se han utilizado las actuales definiciones de la ETSI sobre los paquetes de *geonetworking* [14]. En este caso, los paquetes CDP *geounicast*, *geobroadcast* y SA requerirían 153, 149 y 95.5 octetos respectivamente sin considerar la parte de tamaño variable del *payload* del CDP.

B. Entorno de evaluación

Las prestaciones de DiRCoD han sido evaluadas mediante simulaciones basadas en el análisis de trazas vehiculares obtenidas por el simulador de tráfico SUMO (Simulation of Urban MObility) [15]. El escenario bajo consideración es una calle de 750m, similar a las mostradas en la Figura 2, con un carril por sentido de marcha y dos intersecciones en sus extremos. Las zonas de intersección han sido dimensionadas con un radio de 20m, mientras que las secciones en que DiRCoD divide la calle se han fijado a un valor de 300m que, como ha sido explicado en la sección III.A, representa el rango de comunicaciones en el SCH1. Se considera una densidad media de 21 vehículos por kilómetro y por carril en la calle. Los vehículos utilizan un rango de comunicaciones constante en el CCH que será variado para analizar su influencia. Es asumido además que los mensajes CAM sean transmitidos con una frecuencia de 1Hz, aunque tendencias parecidas se pueden obtener a frecuencias distintas. Los resultados de simulación han sido conseguidos a través de simulaciones con una duración de 5000 segundos a fin de asegurar su precisión estadística.

C. Resultados de las prestaciones

La Figura 3 indica la probabilidad de que los vehículos en la intersección I1 reciban por lo menos un mensaje de conectividad (un CAM con un *connectivity field* en el caso de DiRCoD, o un paquete CDP en el caso de IFTIS) antes de abandonar la zona de intersección². Esta métrica representa la capacidad de las técnicas para proporcionar a los vehículos que entran en la intersección I1 información de conectividad actualizada. Esta información es utilizada para decidir por cual de las calles que salen de la intersección enrutar paquetes de datos en el caso de transmisiones *multi-hop* donde estos vehículos actúen como nodos retransmisores. Como se muestra en la Figura 3, DiRCoD siempre proporciona esta información con una probabilidad más alta, independientemente del rango de transmisión y de su configuración. Además, las prestaciones de DiRCoD aumentan al aumentar el rango de comunicaciones. Los resultados obtenidos demuestran que DiRCoD es capaz de actualizar la información de conectividad *multi-hop* de las

pequeño rango de comunicaciones de 100m, 6 bits para el identificador de la celda son suficientes para representar 64 celdas sobre calles de hasta 12.8km. Al contrario, si se consideran elevados rangos de comunicaciones de, por ejemplo, 500m, la codificación de la celda con 10 bits permite representar escenarios de muy alta densidad con más de 1000 vehículos por celda.

² Las prestaciones de DiRCoD son presentadas para tres configuraciones diferentes en las que el *connectivity field* se agrega a cada mensaje CAM (1), o a uno de cada dos (2), o de cada tres (3) mensajes CAM.

calles con una periodicidad más alta que la de IFTIS. Esto, a su vez, mejora el funcionamiento de los protocolos de enrutamiento en VANETs que eligen de forma dinámica el próximo camino de enrutamiento. Las prestaciones menores de IFTIS se deben a que los paquetes CDP solo pueden ser generados en la intersección I2 por vehículos que anteriormente actualizaron paquetes CDP mientras atravesaban las celdas antes de alcanzar la intersección I2. Como los autores de IFTIS explican, esta característica es necesaria por razones de escalabilidad.

Además de analizar la capacidad de cada técnica de proveer información útil de conectividad a protocolos de enrutamiento, es muy importante investigar la sobrecarga de comunicaciones que estas técnicas crean. En este contexto, la Figura 4 presenta la sobrecarga de comunicaciones media que cada técnica genera para retransmitir la información de conectividad desde la intersección I2 a I1 según el ejemplo mostrado en la Figura 2a). Es importante recordar que la sobrecarga de DiRCoD se genera en el CCH, ya que agrega el *connectivity field* a mensajes CAM. Al contrario, la sobrecarga de IFTIS está repartida entre el CCH (transmisiones de SAs y transmisión *geobroadcast* del paquete CDP en la intersección I1) y el SCH1 (transmisiones *multi-hop geounicast* de paquetes CDP a lo largo de la calle). Es importante además destacar que, para los rangos de comunicaciones más cortos, el tamaño del CDP aumenta, ya que es necesario un número más alto de celdas para cubrir la calle. Los resultados obtenidos muestran claramente que la sobrecarga de comunicaciones generada por DiRCoD es menor que la generada por IFTIS. Sin embargo, dado que DiRCoD actualiza con más frecuencia que IFTIS la información de conectividad (ver la Figura 3), es necesario analizar la sobrecarga no solo para cada transmisión de información de conectividad desde I2 a I1, sino también para un intervalo temporal definido. En este contexto, la Figura 5 muestra la sobrecarga de comunicaciones media generada por ambas técnicas para un intervalo temporal de un segundo. En este caso, la diferencia entre DiRCoD e IFTIS se reduce. Sin embargo, como se ha explicado anteriormente, la sobrecarga generada por DiRCoD puede ser disminuida reduciendo la frecuencia con la que se agrega el *connectivity field* a los mensajes CAM. Como se puede observar en la Figura 3, esta ganancia en términos de menor sobrecarga es obtenida sin afectar significativamente a la probabilidad de que un mensaje de conectividad sea recibido en la intersección I1.

Finalmente, la Figura 6 presenta el ratio entre la sobrecarga de comunicaciones media por segundo introducida por cada técnica en el CCH y la probabilidad de recibir por lo menos un mensaje de conectividad en I1¹. Esta métrica es muy importante ya que representa la eficiencia en proporcionar datos actualizados sobre la conectividad *multi-hop* de la calle a los vehículos que entran en la intersección I1, sin incurrir en una gran sobrecarga de comunicaciones. En este contexto, los resultados obtenidos han mostrado que DiRCoD es capaz de proveer de forma dinámica y eficaz

información de conectividad *multi-hop* con una mínima sobrecarga y con un bajo coste de implementación.

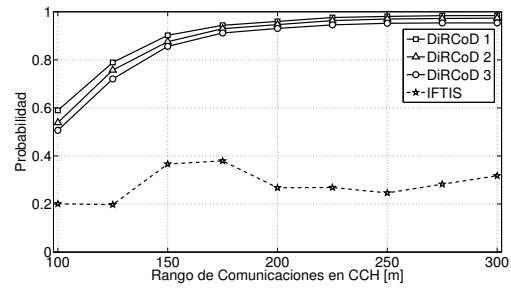


Figura 3. Probabilidad de recibir por lo menos un mensaje de conectividad en la intersección I1.

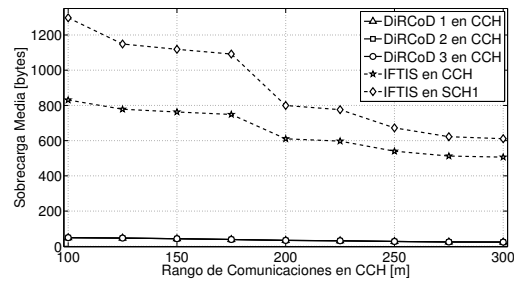


Figura 4. Sobrecarga de comunicaciones media.

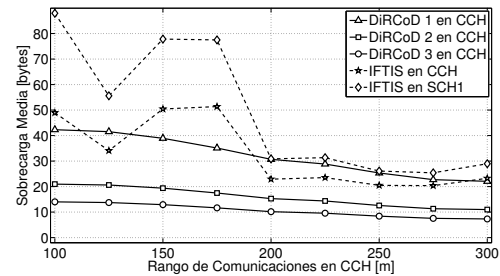


Figura 5. Sobrecarga de comunicaciones media en un segundo.

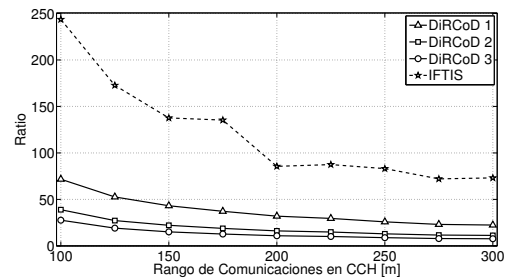


Figura 6. Eficiencia de la sobrecarga de comunicaciones en términos de conectividad *multi-hop*.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Los protocolos de enrutamiento *multi-hop* que utilizan una selección dinámica del camino de enrutamiento basándose en las condiciones actuales del tráfico mejoran los esquemas convencionales de enrutamiento en VANETs. Para utilizar técnicas eficaces y dinámicas de selección de caminos *multi-hop* es necesario desarrollar herramientas de apoyo que computen y actualicen la capacidad de retransmisión *multi-*

¹ Es importante destacar que la sobrecarga de IFTIS en el SCH1 no es considerada en este caso.

hop de estos caminos. Con este propósito, este artículo ha presentado DiRCoD, un mecanismo eficiente que, utilizando mensajes vehiculares *beacon* estándar, permite estimar de forma distribuida la capacidad de enrutamiento de los segmentos de carretera en términos de conectividad *multi-hop*. Como se ha mostrado en este trabajo, DiRCoD es capaz de estimar dinámicamente esta conectividad *multi-hop* con una baja sobrecarga de comunicaciones y con un coste de implementación mínimo.

Los autores de este trabajo están actualmente desarrollando un protocolo de enrutamiento para VANETs que utiliza DiRCoD como herramienta de apoyo. Siguiendo la filosofía de tomar decisiones de enrutamiento en las intersecciones en base al estado de conectividad de las distintas calles, la finalidad de dicho protocolo será la de garantizar la correcta entrega de los paquetes, independientemente de las variaciones de la distribución del tráfico de vehículos en la red de carreteras considerada. En este contexto, se aprovechará la capacidad de DiRCoD para medir la conectividad con un bajo consumo de recursos radio, garantizando el funcionamiento en escenarios de elevada utilización del canal provocada por una alta densidad de vehículos. Además, se implementarán las funcionalidades necesarias para mantener las prestaciones de encaminamiento en aquellos casos en que una baja densidad de vehículos dificulte el enrutamiento de los paquetes hasta el destino.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Comisión Europea a través del proyecto FP7 iTETRIS: An Integrated Wireless and Traffic Platform for Real-Time Road Traffic Management Solutions (No. FP7 224644). Los autores desean agradecer a la Comisión el apoyo recibido.

REFERENCIAS

- [1] B. Karp and H. T. Kung, "GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks," en Libro de Actas ACM/IEEE MOBICOM'00, Boston, Massachusetts, USA, 2000, pgs. 243–254
- [2] H. Fussler, J. Widmer, M. Kasemann, M. Mauve, and H. Hartenstein "Contention-based forwarding for mobile ad hoc networks", en Ad Hoc Networks, vol. 1, no. 4, pgs.351-369, Nov. 2003.
- [3] R. Bauza, J. Gozávez and M. Sepulcre, "Operation and Performance of Vehicular Ad-hoc Routing Protocols in Realistic Environments", en Libro de Actas IEEE 68th Vehicular Technology Conference, 2008, VTC 2008-Fall, pgs.1-5, 21-24 Sept. 2008
- [4] Jing Tian, Lu Han, K. Rothermel, "Spatially aware packet routing for mobile ad hoc inter-vehicle radio networks", en Libro de Actas IEEE Intelligent Transportation Systems 2003, vol.2, pgs. 1546- 1551, 12-15 Oct. 2003
- [5] C. Lochert, H. Hartenstein, J. Tian, H. Fussler, D. Hermann, and M. Mauve , "A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments," en Libro de Actas IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2003, pgs. 156- 161, 9-11 Junio 2003
- [6] Jing Zhao, Guohong Cao, "VADD: Vehicle-Assisted Data Delivery in Vehicular Ad Hoc Networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology , vol.57, no.3, pgs.1910-1922, Mayo 2008
- [7] Jaehoon Jeong, Shuo Guo, Yu Gu, Tian He, D. Du, "TBD: Trajectory-Based Data Forwarding for Light-Traffic Vehicular Networks," en Libro de Actas 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems ICDCS '09, 2009, pgs.231-238, 22-26 June 2009
- [8] K.C. Lee, M. Le, J. Harri, M. Gerla, "LOUVRE: Landmark Overlays for Urban Vehicular Routing Environments," en Libro de Actas IEEE 68th Vehicular Technology Conference VTC 2008-Fall, 2008, pgs.1-5, 21-24 Sept. 2008
- [9] J. Nzouonta, N. Rajgure, Guiling Wang, C. Borcea, "VANET Routing on City Roads Using Real-Time Vehicular Traffic Information," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.58, no.7, pp.3609-3626, Sept. 2009
- [10] M. Jerbi, S.-M. Senouci, T. Rasheed, Y. Ghamri-Doudane, "Towards Efficient Geographic Routing in Urban Vehicular Networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.58, no.9, pp.5048-5059, Nov. 2009
- [11] M. Jerbi, S.-M. Senouci, T. Rasheed, Y. Ghamri-Doudane, "An Infrastructure-Free Traffic Information System for Vehicular Networks," en Libro de Actas IEEE 66th Vehicular Technology Conference, 2007, VTC-2007 Fall, pgs.2086-2090, 30 Sept. 2007-3 Oct. 2007
- [12] COMeSafety consortium, "D31: European ITS Communication Architecture: Overall Framework Proof of Concept Implementation", COMeSafety European Specific Support Action Public Deliverable, Dic. 2009
- [13] ETSI TC ITS, "Intelligent Transport Systems (ITS); Communications; Architecture; Vehicular Communication, Basic Set of Applications, Part 4: Operational Requirements", Draft ETSI DTS 102 637-4, Marzo 2010
- [14] ETSI TC ITS, "Intelligent Transport Systems (ITS); Communications; Architecture; Vehicular Communications, Part 4: Geographical Addressing and Forwarding for Point-to-Point and Point-to-Multipoint Communications; Sub-part 1: Media-Independent Functionality", Draft ETSI TS 102 636-4-1 v0.0.5, Enero 2010
- [15] Simulation of Urban MObility (SUMO) <http://sourceforge.net/apps/mediawiki/sumo/>