

Enrutamiento Basado en Conectividad Multi-hop en Redes Ad-hoc Vehiculares

Michele Rondinone y Javier Gozalvez

Ubiquitous Wireless Communications Research Laboratory

Uwicare, <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- El enrutamiento de datos en redes ad-hoc de comunicaciones vehiculares ha sido recientemente abordado con técnicas que eligen dinámicamente los caminos de enrutamiento en base a estimaciones de la densidad de vehículos en distintas calles obtenidas en tiempo real. La mayoría de estas técnicas utilizan métodos de encaminamiento *multi-hop* en los que el poseedor actual del paquete elige el próximo retransmisor (esquemas de retransmisión *sender-based*). Sin embargo, la estimación de la densidad vehicular puede necesitar una considerable sobrecarga de comunicaciones, y las retransmisiones *multi-hop* del tipo *sender-based* pueden aumentar la utilización de enlaces radio poco fiables. En este contexto, este artículo presenta un novedoso protocolo de enrutamiento basado en contención en el que los caminos *multi-hop* se eligen dinámicamente en base a la conectividad que proporcionan. Los resultados obtenidos demuestran que, gracias a su diseño y a la optimización de sus parámetros, la técnica propuesta en este artículo obtiene unos altos niveles de entrega de paquetes al destino utilizando de manera eficiente el canal de comunicaciones inalámbrico.

Palabras Clave- Redes Ad-hoc de Comunicaciones Vehiculares; Enrutamiento; Conectividad Multi-hop; Retransmisión Basada en Contención

I. INTRODUCCIÓN

Las redes ad-hoc de comunicaciones vehiculares (en inglés *Vehicular Ad-hoc Networks* o VANETs) utilizan comunicaciones radio para mejorar la seguridad vial y la eficiencia del tráfico a través del intercambio dinámico de información entre vehículos y con la infraestructura de comunicaciones. Las comunicaciones vehiculares se basan normalmente en los estándares IEEE 802.11p y WAVE (Wireless Access for Vehicular Environments) que están siendo adaptados a nivel europeo por la ETSI (European Telecommunications Standards Institute) [1]. En las VANETs, la información acerca de situaciones de tráfico locales (p.e. atascos o accidentes) puede ser transmitida a vehículos posicionados en zonas lejanas de la red de carreteras utilizando comunicaciones *multi-hop* a través de vehículos retransmisores intermedios. Sin embargo, la eficacia de las transmisiones *multi-hop* depende considerablemente de los protocolos de enrutamiento que se utilicen, y de los desafíos planteados por la alta movilidad de los vehículos y las adversas condiciones de propagación en entornos vehiculares. Estos desafíos han sido abordados de manera distinta por los diferentes tipos de protocolos de enrutamiento vehiculares presentados en la literatura hasta la

fecha. Las propuestas más recientes intentan seleccionar los caminos *multi-hop* de manera dinámica basándose en estimaciones del estado del tráfico en tiempo real. Con este objetivo, las técnicas propuestas seleccionan calles caracterizadas por una alta densidad vehicular para asegurar la presencia de un número suficiente de vehículos retransmisores. Sobre los caminos *multi-hop* seleccionados, estas técnicas utilizan normalmente esquemas de retransmisión denominados en inglés *sender-based*, lo cual representa situaciones en las que el nodo actualmente encargado de transmitir el paquete de datos (*sender*) elige cómo próximo retransmisor entre sus nodos vecinos aquel que más progreso proporciona hacia el destino. En este contexto cabe destacar que la estimación de la densidad vehicular de forma distribuida y en tiempo real puede generar una importante sobrecarga de comunicaciones, comprometiendo así la eficiente utilización del medio inalámbrico [16]. Además, para aumentar su fiabilidad los métodos de retransmisión *sender-based* pueden necesitar la utilización de contramedidas a expensas de un incremento de la sobrecarga de comunicaciones o de la complejidad de la propuesta [12]. Para superar estas limitaciones, este artículo presenta un novedoso esquema que usa un método de retransmisión *broadcast* basado en contención (*contention-based*) y que elige los caminos *multi-hop* de forma dinámica estimando su conectividad. Como se demostrará en el artículo, gracias a una adecuada optimización de sus parámetros, esta propuesta puede proporcionar un buen rendimiento en términos de paquetes de datos entregados al destino, garantizando a la vez una gestión eficiente del canal de comunicaciones.

II. ESTADO DEL ARTE

Los estándares de comunicaciones vehiculares utilizan mensajes *broadcast* periódicos (*beacons*) para informar a los vehículos vecinos sobre la posición geográfica de un vehículo. Los esquemas denominados en inglés *greedy forwarding* aprovechan esta información para seleccionar como retransmisores aquellos vehículos que proporcionan más progreso hacia el destino final de los paquetes de datos. Como ejemplos básicos de este enfoque se pueden citar los protocolos Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) [3] y Contention-Based Forwarding (CBF) [4]. Estas propuestas pueden sufrir el problema del “máximo local” cada vez que

un paquete alcanza un nodo que no tiene vecinos que ofrecen más progreso hacia el destino que él. Este problema tiene una relevancia particular en escenarios urbanos, donde la presencia de edificios puede “ocultar” a los retransmisores óptimos, generando situaciones de máximo local más a menudo [5]. En estos casos, un protocolo podría intentar un proceso de recuperación de la retransmisión, generando un coste adicional de recursos de comunicaciones, o interrumpir el enrutamiento, causando un empeoramiento de la tasa de paquetes entregados. Para superar estos problemas se han propuesto protocolos que, como Spatially Aware Routing [6], gracias a la ayuda de mapas digitales, encaminan los paquetes a través de caminos geográficos fijos constituidos por un conjunto de intersecciones intermedias que conectan origen y destino de la transmisión. Sobre estos caminos, dirigen el paquete de datos hacia los vehículos que se encuentran en intersecciones intermedias para proporcionar una visión más completa de los posibles retransmisores en cada dirección. Sin embargo, la propuesta SAR selecciona el conjunto de intersecciones basándose únicamente en la menor distancia entre origen y destino, lo cual puede empeorar de manera significativa la correcta entrega de paquetes si el camino escogido no proporciona una adecuada conectividad por falta de vehículos.

Para evitar situaciones de este tipo, y facilitar las comunicaciones *multi-hop*, Vehicle-Assisted Data Delivery (VADD) [7] propone encaminar los paquetes a través de caminos geográficos caracterizados por una alta densidad de vehículos. Para detectar dichos caminos, VADD supone la utilización de sistemas GPS (Global Positioning System) capaces de proporcionar una caracterización estadística de la densidad vehicular de las calles. Aunque este enfoque podría resultar válido en término medio, no puede asegurar la necesaria conectividad *multi-hop* en cada momento, especialmente en el caso en que se produzcan cambios inesperados en la distribución de los flujos de tráfico. Propuestas como Landmark Overlays for Urban Vehicular Routing Environments (LOUVRE) [8] reaccionan a estas situaciones gracias al empleo de información de tráfico en tiempo real. En LOUVRE, los vehículos “midan” en tiempo real las densidades vehiculares en entornos locales y diseminan esta información a través de mensajes periódicos para obtener un mapa de la conectividad de la red de carreteras compartido por todos los nodos. Sin embargo, aunque proporcione un buen rendimiento, LOUVRE requiere una considerable sobrecarga de comunicaciones para mantener el mapa de conectividad actualizado. SADV (Static node Assisted adaptive Data dissemination protocol for Vehicular networks) [9] encamina los paquetes de datos a través de nodos estáticos posicionados en cada intersección. Los vehículos diseminan las estimaciones del tiempo que los paquetes necesitan para ser entregados entre dos intersecciones adyacentes, de manera que el protocolo puede adaptar la selección de los caminos de enrutamiento a la distribución del tráfico de vehículos en la red de carreteras. No obstante esta capacidad adaptativa, SADV se basa en la hipótesis inverosímil de que existen nodos estáticos desplegados en cada intersección. El protocolo Improved Greedy Traffic Aware Routing (GyTAR) [10] actualiza dinámicamente los caminos de enrutamiento cada vez que se recibe un paquete en una intersección. GyTAR selecciona la

próxima intersección hacia la que el paquete tiene que ser dirigido considerando el progreso que la intersección proporciona hacia el destino final, y la densidad vehicular estimada a través de la técnica IFTIS (Infrastructure-Free Traffic Information System) [11].

La mayoría de los protocolos de enrutamiento mencionados adoptan mecanismos de retransmisión *sender-based* en los que el paquete se transmite de manera *unicast* a los nodos vecinos que más progreso proporcionan hacia el destino. Este tipo de retransmisión puede reducir el número de *hops* y la latencia, pero también puede provocar la utilización de enlaces radio que no siempre garantizan fiabilidad y estabilidad y por lo cual incrementan la sobrecarga debida a retransmisiones [12]. De otro lado, los métodos de retransmisión *contention-based* transmiten los paquetes de manera *broadcast*. Los nodos receptores activan mecanismos de contención según los que el próximo retransmisor se elige entre ellos de forma distribuida. Este enfoque obliga a varios nodos a recibir y procesar el mismo paquete, pero también incrementa la probabilidad de que en cada *hop* por lo menos un nodo retransmita el paquete. Además de CBF, también los protocolos CBRP (Contention-Based Routing Protocol) [13] y CLA-S (Connection-Less Approach for Streets) [14] aplican el método *contention-based*. CBRP supone el uso de nodos estáticos en las intersecciones para informar a los vehículos acerca de los caminos de enrutamiento más fiables para utilizar. Por otro lado, CLA-S introduce el concepto de “*forwarding area*” (area de retransmisión) como el conjunto de calles paralelas e intersecciones en las que el paquete tiene que ser replicado. La existencia de múltiples caminos paralelos aumenta la posibilidad de encontrar, entre ellos, un camino *multi-hop* conectado de origen a destino, pero también incrementa la sobrecarga de comunicaciones. Más recientemente, el protocolo BRAVE (Beacon-less Routing Algorithm for Vehicular Environments) [15] ha sido propuesto para encaminar paquetes de datos de manera dinámica utilizando el método *contention-based*. BRAVE calcula los caminos de enrutamiento más convenientes según una métrica arbitraria, pero permite cambiar estos caminos a lo largo del proceso de enrutamiento en caso de que falten vehículos retransmisores en ellos. Sin embargo, dichos cambios sólo se basan en información acerca del entorno local de un nodo, sin evaluar si existe conectividad *multi-hop* en un rango mayor.

III. DESCRIPCIÓN DE TOPOCBF

Para aprovechar de los beneficios ofrecidos por los esquemas de retransmisión basados en contención y de los protocolos que utilizan información de tráfico en tiempo real en sus decisiones de enrutamiento, este artículo presenta TOPOCBF (Road Topology-Aware Contention-Based mechanism). De manera parecida a GyTAR, TOPOCBF selecciona dinámicamente los caminos de enrutamiento en las intersecciones, pero en vez de estimar la densidad vehicular, basa sus decisiones en la conectividad *multi-hop* estimada gracias al algoritmo DiRCoD (Distributed and Real Time Communications Road Connectivity Discovery mechanism) [16]. Como se demuestra en [16], la estimación de la conectividad *multi-hop* de las calles requiere una cantidad de sobrecarga de comunicaciones considerablemente más baja que la estimación de la densidad vehicular. Además, las

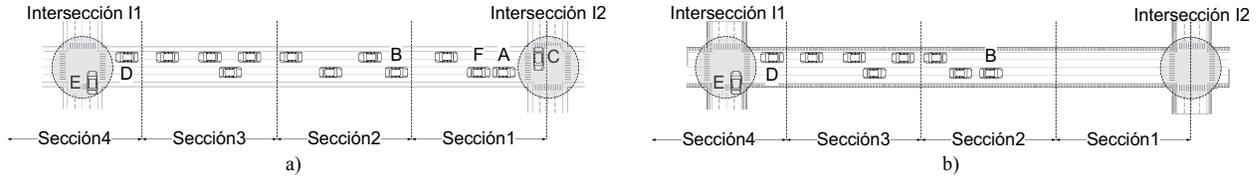


Figura 1. Calle con conectividad *multi-hop* total (a), y con conectividad *multi-hop* parcial (b)

decisiones de enrutamiento basadas en la conectividad *multi-hop* pueden ayudar a distribuir espacialmente y balancear la sobrecarga debida a paquetes de ruteo en la red de carreteras, evitando que los paquetes sean transmitidos siempre a través de las calles más ocupadas, siendo estas las que más podrían sufrir una congestión del medio inalámbrico.

A. DiRCoD

DiRCoD utiliza comunicaciones vehiculares para calcular la conectividad *multi-hop* de una calle y notificar esta información a las intersecciones que la delimitan. Para su funcionamiento, utiliza mensajes *beacon* periódicos, actualmente en proceso de definición en los estándares internacionales [2]. Para explicar el algoritmo, considérense calles como las de la Figura 1 delimitadas por dos intersecciones I1 e I2. En este escenario un vehículo E que entra en la intersección I1 requiere la información acerca de la conectividad de la calle en la dirección de I2 para decidir si conviene encaminar un paquete en esta dirección o en otra. Con este objetivo, DiRCoD incluye campos adicionales de pocos bits denominados *Connectivity Fields* (CFs) en los *beacons* transmitidos por los vehículos que se encuentran en la calle. Los CFs indican el estado de conectividad *multi-hop* de la calle. Para representar su conectividad, DiRCoD divide la calle en secciones numeradas con valores crecientes según sus distancias de I2 y con una longitud igual al rango de comunicación medio de los vehículos. DiRCoD define la “distancia virtual” que separa I1 de I2 como el número de secciones (o *hops*) entre I2 y el vehículo más cercano a I2 que puede ser alcanzado desde I1 a través de transmisiones *multi-hop*. La Figura 1b) representa una calle que ofrece una conectividad *multi-hop* parcial. En este caso, la distancia virtual detectada en I1 para I2 es de 2 *hops*, ya que un paquete transmitido desde I1 sólo puede alcanzar un vehículo que se encuentra a 2 *hops* de distancia de I2. Por el contrario, en la Figura 1a) se representa una calle con conectividad *multi-hop* total. En este caso, la distancia virtual entre I1 e I2 es ‘0’, ya que el paquete puede atravesar toda la calle y alcanzar I2 a través de transmisiones *multi-hop*.

Los CFs de DiRCoD se añaden a los *beacons* sólo en aquellos vehículos situados en la parte interior de la calle, y no en aquellos que se encuentran en el interior de las zonas circulares alrededor de las intersecciones (“*intersection zones*” marcadas en gris en la Figura 1). Un vehículo añade un CF que indica la sección de la calle en la que se encuentra actualmente a menos que no detecte (consultando su tabla de vecinos actualizada a través de recepciones de mensajes *beacons*) la presencia de otros vehículos más cercanos que él a la intersección I2, o dentro de la *intersection zone* I2 misma. Considerando la Figura 1b), el vehículo B indica en su *beacon* una distancia virtual de ‘2’, ya que detecta que no hay otros vehículos más cercanos que él a I2. Por contra, el vehículo F en la Figura 1a) (que en principio añadiría un CF

de ‘1’ en su *beacon*) no incluye ningún CF ya que detecta la presencia del vehículo C en I2. El vehículo F incluye un CF que indica ‘0’ sólo tras la recepción de un *beacon* del vehículo C en I2. Asimismo, el vehículo B posicionado en la sección 2 de la Figura 1a) incluye un CF de ‘0’ sólo tras la recepción del *beacon* emitido por F con un CF de este mismo valor. A través de este proceso secuencial, los CFs son retransmitidos hacia I1. Los vehículos posicionados en I1 recibirán un mensaje *beacon* con un CF de ‘0’ que indica conectividad *multi-hop* total en la Figura 1a), y un CF de ‘2’ que indica conectividad *multi-hop* parcial en la Figura 1b).

Sin embargo, si todos los vehículos en la parte interior de la calle incluyeran un CF en sus *beacons*, las estimaciones de conectividad generadas por DiRCoD serían redundantes, lo cual podría comprometer la escalabilidad del algoritmo. Para evitar este problema, DiRCoD define un mecanismo basado en contención en el que sólo uno entre todos los nodos que reciben un CF lo retransmiten hacia I1 [16]. Además, DiRCoD ha sido diseñado para controlar el periodo entre dos evaluaciones consecutivas de la conectividad de la calle. Para ello se define el “*connectivity field generation period*” como el tiempo que los vehículos tienen que esperar antes de que puedan volver a competir para generar o retransmitir nuevos CFs. En este contexto, si el tráfico en la calle no varía con rapidez, el *CF generation period* podrá ser fijado a un valor más alto, de manera que la frecuencia de las medidas de conectividad será menor, y por consiguiente se reducirá la sobrecarga en el canal de comunicaciones.

B. TOPOCBF

TOPOCBF es una evolución del protocolo CBF (Contention-Based Forwarding) [4], diseñado para utilizar la información sobre la conectividad *multi-hop* de las calles proporcionada por DiRCoD en sus decisiones de enrutamiento dinámicas. En CBF, los paquetes de datos se retransmiten a través de transmisiones *broadcast*. Los nodos receptores activan un temporizador cuya duración es inversamente proporcional al progreso proporcionado hacia el destino final. Al caducar este temporizador, el paquete es retransmitido por el nodo más cercano al destino. Al “escuchar” la retransmisión del paquete, los nodos con el temporizador activo suprimen sus intentos de retransmisión. Los resultados contenidos en [12] demuestran que CBF consigue tasas de entrega de paquetes más altas que los protocolos básicos que utilizan esquemas de retransmisión del tipo *sender-based*. Como los autores indican, los esquemas *sender-based* necesitan muchos intentos de transmisión para combatir la pérdida de paquetes, y requieren que los *beacons* se intercambien con una frecuencia relativamente alta para detectar los retransmisores fiables.

Aprovechando el buen rendimiento y la sencillez del esquema de retransmisión de CBF, TOPOCBF se ha diseñado para dirigir los paquetes de manera iterativa hacia

puntos intermedios (en este caso intersecciones) posicionados en el camino para alcanzar el destino final, y para escoger de forma dinámica la próxima calle en base a su conectividad *multi-hop*. Una vez se haya elegido la próxima calle, el objetivo de TOPOCBF es alcanzar el vehículo que más esté cerca de la próxima intersección utilizando un esquema de *greedy forwarding*. La selección de dicho vehículo permitirá una mejor visión de la conectividad *multi-hop* de las calles adyacentes y por lo tanto una mejor selección de la próxima intersección. Para alcanzar un vehículo en una intersección, TOPOCBF utiliza un sistema de retransmisión del tipo *contention-based*, para el que es necesario que los paquetes incluyan las coordenadas geográficas del centro de la intersección en un campo adicional denominado “*next intersection field*”. Para seleccionar la próxima intersección, un vehículo posicionado en la intersección a la que el paquete se dirige actualmente utiliza la información de conectividad *multi-hop* de las intersecciones adyacentes proporcionada por DiRCoD. El proceso de selección de intersecciones consecutivas se repite hasta que se alcanza un vehículo que puede contactar directamente con el destino final del paquete.

Tomando como ejemplo el escenario de la Figura 1, supóngase que el vehículo E en II necesita encaminar un paquete hacia un destino D. TOPOCBF selecciona la próxima intersección analizando los siguientes requisitos:

1. *Progreso hacia el destino final*. Solo se consideran aquellas intersecciones que proporcionan un progreso hacia el destino final D;

2. *Validez temporal de la información de conectividad de una calle*. Al entrar en la *intersection zone* de II, el vehículo E procesa los *beacon* recibidos para analizar los CFs que se refieren a las intersecciones adyacentes. A la hora de encaminar un paquete de datos, E comprueba los instantes en los que se recibieron los últimos CFs relativos a las intersecciones que cumplen el requisito 1. En caso de que la información de un CF relativo a una de estas intersecciones sea más antigua que el *CF generation period* definido por DiRCoD, E interpretaría que la calle que conduce a aquella intersección no proporciona conectividad *multi-hop*¹. Por lo tanto, en su selección de la próxima intersección, E consideraría como posibles candidatas sólo aquellas intersecciones para las que el último CF se haya recibido durante el último período de CET segundos. CET es el acrónimo de “*connectivity expiry time*”, definido por TOPOCBF y que debe ser superior al *CF generation period*.

3. *Estado de la conectividad multi-hop de la calle*. Según DiRCoD, las calles adyacentes a una intersección proporcionan conectividad *multi-hop* total o parcial dependiendo de la distancia virtual contenida en los CF recibidos. Si más de una intersección adyacente cumple las propiedades 1. y 2., el vehículo E selecciona como próxima intersección aquella que proporcione la mínima distancia virtual. En el caso en dos (o más) intersecciones ofrezcan la misma distancia virtual, E selecciona la próxima intersección entre ellas de manera aleatoria. Por lo contrario, si ninguna

de las intersecciones adyacentes cumple las condiciones mencionadas arriba, el paquete se pierde.

Una diferencia importante entre CBF y TOPOCBF es que, en su esquema de retransmisión *contention-based*, CBF activa temporizadores cuya duración depende del progreso que los nodos receptores proporcionan hacia el destino final del paquete. Por el contrario, TOPOCBF calcula la duración del temporizador de retransmisión t_A en función del progreso proporcionado por un vehículo receptor A hacia la próxima intersección Int a la que se dirige el paquete:

$$t_A = \begin{cases} t_{\max} \left(1 - \left(\frac{p_A}{p_{\max}} \right) \right) & \text{si } d_{S-Int} > p_{\max} \\ t_{\max} \left(1 - \left(\frac{p_A}{d_{S-Int}} \right) \right) & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (1)$$

En la fórmula (1), p_{\max} indica el progreso máximo que un nodo receptor puede proporcionar al vehículo S del cual se ha recibido el paquete y por lo tanto corresponde rango de comunicaciones máximo de S . t_{\max} es la máxima duración que puede tener el temporizador de retransmisión. En el caso en

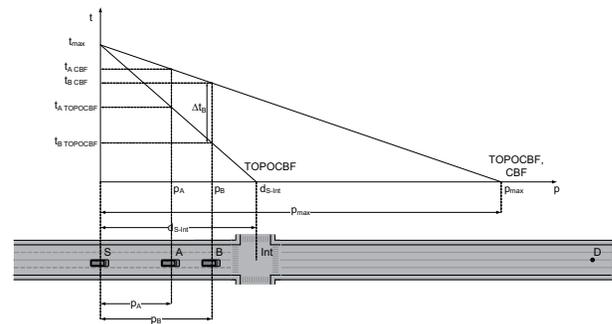


Figura 2. Cálculo de la duración del temporizador de retransmisión en TOPOCBF y CBF

que la distancia que separa el transmisor S de la intersección Int sea mayor de p_{\max} , se adopta la primera línea de la ecuación (1)². Por el contrario, si Int se encuentra dentro del máximo rango de comunicación de S , entonces el máximo progreso que un nodo receptor podrá proporcionar hacia la intersección será la distancia d_{S-Int} que separa S de Int . Por lo tanto, en la computación de la duración del temporizador de retransmisión se adoptará el valor d_{S-Int} , como se indica en la segunda línea de la ecuación (1). Este último caso se ha representado esquemáticamente en la Figura 2. Como puede apreciarse, la fórmula (1) posibilita que TOPOCBF tenga duraciones del temporizador de retransmisión inferiores cuando son calculadas en las proximidades de las intersecciones a las que se dirige el paquete, y por lo tanto evita acumular retrasos innecesarios.

Cabe también destacar que TOPOCBF reduce el problema sufrido por CBF de crear caminos de retransmisión paralelos entre origen y destino del paquete en escenarios urbanos y

¹ Por lo explicado en el apartado III.A, si la calle proporciona conectividad *multi-hop* parcial o total, el vehículo E recibe los CFs cada *CF generation period* segundos.

² La primera línea de la ecuación (1) también corresponde a la fórmula con la que CBF calcula la duración de su temporizador de retransmisión.

suburbanos cuando se dan condiciones de ausencia de línea de visión directa entre transmisores y receptores [5]. La naturaleza *broadcast* incontrolada de CBF causa que los paquetes se repliquen sobre caminos de enrutamiento paralelos hacia el destino, generando un exceso de carga de comunicación redundante. TOPOCBF elimina este problema ya que los paquetes se dirigen desde una intersección hacia la próxima seleccionada. Por lo tanto, los vehículos que reciben paquetes en calles que no conducen hacia la intersección seleccionada, los descartan por no proporcionar progreso hacia ella.

IV. EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO

A. Entorno de Evaluación

Las prestaciones de TOPOCBF han sido investigadas a través de simulaciones en la plataforma iTETRIS (an Integrated Wireless and Traffic Platform for Real-Time Road Traffic Management Solutions, <http://ict-itetris.eu/>) y su simulador de comunicaciones vehiculares implementado en ns-3 (<http://www.nsnam.org/>). TOPOCBF ha sido comparado con CBF y con el protocolo para transmisiones *geounicast* implementado en iTETRIS por defecto, denominado en lo sucesivo como GEOUNICAST. GEOUNICAST es un ejemplo simple de esquema del tipo *sender-based* especificado por el proyecto GeoNet [17] y que se corresponde con el método *greedy forwarding* utilizado en GPSR. En GEOUNICAST, un nodo elige cómo próximo retransmisor el vecino que más esté cercano del destino final del paquete; los vecinos candidatos son todos aquellos registrados en la tabla de vecinos durante 5 segundos desde la recepción del último *beacon* recibido. La implementación de los paquetes utilizados por CBF y GEOUNICAST se corresponde exactamente al formato definido por ETSI para transmisiones de tipo *geonetworking* [2]. Basándose en este formato, TOPOCBF incluye 8 bytes adicionales a sus paquetes para el *next intersection field*. En este artículo, la implementación de DiRCoD supone un *CF generation period* de 2s y un CF con una longitud de 4 bits. Las simulaciones reproducen el enrutamiento de un paquete *geounicast* (mensajes de notificación) entre un vehículo originador y una RSU fija cómo destino. El tamaño de la carga útil de los mensajes de notificación a nivel de aplicación se ha fijado a 300 bytes. Los mensajes de notificación se generan con una frecuencia de 1Hz durante 1000s, lo cual constituye el tiempo simulado.

Utilizando el simulador de tráfico SUMO (Simulation of Urban Mobility <http://sourceforge.net/apps/mediawiki/sumo/>), se ha creado un escenario urbano del tipo Manhattan con 6 calles horizontales y 6 verticales que se cruzan en intersecciones y forman segmentos de calles de longitud de 300m en las que la máxima velocidad permitida es 50 km/h. Los resultados descritos en este apartado corresponden a una densidad vehicular media de 11 vehículos por kilómetro por carril. Basándose en la clasificación definida por la compañía Skycomp [19], dicha densidad vehicular correspondería a un nivel de servicio (en inglés *Level-of-Service* o LOS) de 'C' correspondiente a condiciones de tráfico moderadas. La métrica LOS ha sido propuesta en el Highway Capacity Manual (HCM) [18], y proporciona una medida para describir las condiciones de funcionamiento de la infraestructura de

tráfico. Skycomp extiende la propuesta de HCM para el caso escenarios urbanos y define un sistema para categorizar el LOS en base al número medio de vehículos en los pelotones que se forman en las calles.

En las simulaciones, los vehículos comunican entre ellos utilizando interfaces radio ETSI ITS G5A [1], la adaptación europea del estándar IEEE 802.11p/WAVE. Debido al importante impacto de las de la propagación radio sobre las comunicaciones vehiculares, en este trabajo se han considerado condiciones de propagación realistas (incluyendo atenuación de la señal y desvanecimiento lento y rápido) a través del modelado de propagación urbano en micro-celdas en el ancho de banda de 5 GHz desarrollado en el proyecto europeo WINNER [20], incluido en iTETRIS. La potencia de transmisión utilizada ha sido fijada a 20dBm (100mW). Con esta potencia de transmisión en el modelado de propagación radio utilizado, dos vehículos separados por 200m pueden comunicarse con una tasa de recepción media de paquetes de 70%. Teniendo en cuenta este dato, se ha escogido el valor de 200m como rango de comunicaciones medio para fijar la longitud de las secciones de calles utilizadas por el algoritmo DiRCoD. Esta selección conservadora permite al algoritmo proporcionar estimaciones estables de la conectividad *multi-hop*, que no se ven afectadas por condiciones de propagación esporádicas favorables.

B. Resultados

La Figura 3 compara las prestaciones obtenidas por los tres protocolos de enrutamiento. La Figura 3a) representa la tasa de paquetes entregados (en inglés *Packet Delivery Rate* o PDR) al destino, y la Figura 3b) la sobrecarga de enrutamiento, que se define como la cantidad total de información transmitida en el canal de comunicaciones para encaminar los paquetes (en inglés *Routing overhead*). Como se demuestra en [5], CBF duplica los paquetes en las intersecciones y crea caminos de enrutamiento paralelos. Debido a esto obtiene un excelente PDR que se acerca al 99%. Por lo contrario, GEOUNICAST presenta unas muy bajas prestaciones en términos de PDR debido a la elección de nodos retransmisor con enlaces poco fiables, resultado de su esquema de retransmisión *sender-based*. Los resultados de la Figura 3 para TOPOCBF se han obtenido considerando un radio R de la *intersection zone* de DiRCoD de 20m y un *connectivity expiry time* CET de 2.5s. Aunque no utilice caminos paralelos como CBF, TOPOCBF es capaz de obtener un PDR de 72%, con un 38% de sobrecarga de enrutamiento menos con respecto a CBF. La sobrecarga de enrutamiento de CBF distingue entre la transmisión de paquetes de enrutamiento y los bytes adicionales utilizados por el algoritmo DiRCoD e incluidos en los *beacons*. En este contexto, es interesante analizar el compromiso entre PDR y sobrecarga de comunicaciones representado en la Figura 4 a través de la métrica "sobrecarga útil" (en inglés *useful overhead*), definida como el ratio entre la sobrecarga generada por cada protocolo y la PDR obtenido. Esta métrica mide lo útil que ha sido la sobrecarga utilizada por un protocolo a lo largo del proceso de enrutamiento en términos de PDR conseguido. En principio, cuanto menor sea la sobrecarga útil, más eficiente será la sobrecarga de enrutamiento introducida por un protocolo. La figura 4 sólo representa la sobrecarga útil para los protocolos CBF y TOPOCBF, ya que en el protocolo GEOUNICAST, el nivel

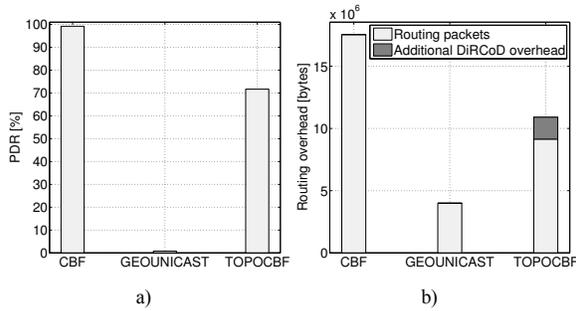
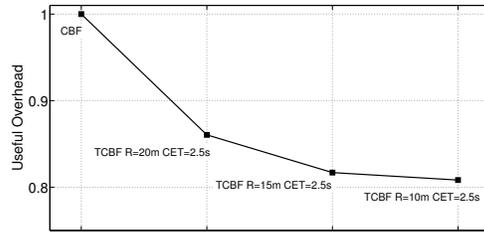
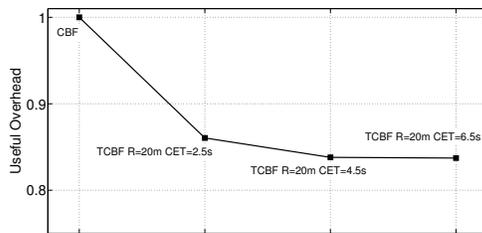


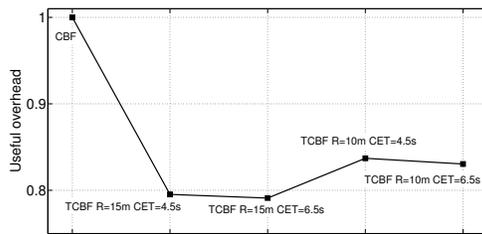
Figura 3. Comparación de la PDR (a) y de la sobrecarga de enrutamiento (*routing overhead*) (b)



a)



b)



c)

Figura 4. Sobrecarga útil (*useful overhead*) en CBF y TOPOCBF en función del radio R de la *intersection zone* de DiRCoD (a), del *connectivity expiry time* CET (b), y de valores combinados de R y de CET (c)

muy reducido de PDR conlleva un nivel de sobrecarga útil muy alto. Para facilitar la comparación, la métrica representada ha sido normalizada por la sobrecarga útil de CBF. La figura 4 indica que con su configuración inicial (R=20m y CET=2.5s), TOPOCBF reduce de un 14% la sobrecarga útil de CBF, y por lo tanto se puede considerar más eficiente.

Para mejorar las prestaciones y la operación de TOPOCBF, este artículo analiza la optimización de algunos de sus parámetros de diseño, en particular R y CET. La optimización ha sido efectuada mediante simulaciones motivadas por consideraciones lógicas sobre el impacto que la variación de los distintos parámetros de diseño podían producir en las

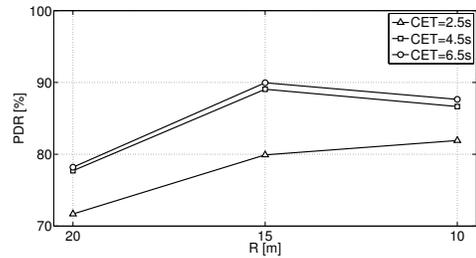


Figura 5: PDR de TOPOCBF en función de R y CET

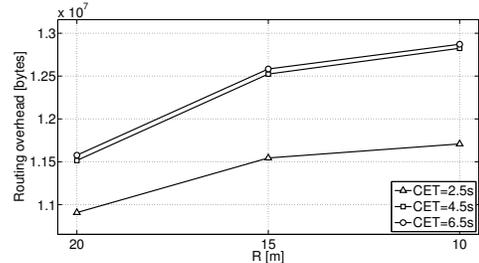


Figura 6. Sobrecarga de enrutamiento (*routing overhead*) de TOPOCBF en función de R y CET

prestaciones del protocolo. Las Figuras 5 y 6 representan los efectos causados al reducir el valor de R e incrementar el valor del CET, sobre la PDR y sobre la sobrecarga de enrutamiento. Los resultados obtenidos demuestran que, si se fija el valor de CET a 2.5s y se incrementa el radio R de la *intersection zone* de DiRCoD, se obtiene un incremento de la PDR (82% frente al 72% de la Figura 3). Esto se debe a que al reducir el radio R, hay más vehículos involucrados en la generación y la retransmisión de los CFs de DiRCoD en la parte interior de la calle. Por consiguiente, se reciben más CFs en las intersecciones y TOPOCBF pierde menos paquetes de enrutamiento en ellas, al no tener medidas de conectividad *multi-hop* de las calles adyacentes. De forma análoga, si se fija el valor de R a 20m, un incremento del CET, también produce un incremento de la PDR (hasta el 78%), ya que permite que TOPOCBF retransmita paquetes en las intersecciones aunque no disponga de información de conectividad que haya sido actualizada recientemente. Sin embargo, en ambos casos el incremento de la PDR se produce a expensas de una mayor cantidad de sobrecarga de enrutamiento (Figura 6). No obstante esto, las Figuras 4a) y 4b) demuestran que la subida de sobrecarga de enrutamiento no se traduce en un incremento de la sobrecarga útil. Estos resultados han motivado el análisis de los efectos que una combinación de valores bajos de R y altos CET pueden producir en las prestaciones de TOPOCBF. Como se muestra en la Figura 5, la mejor combinación de los parámetros de optimización se produce fijando R a 15m y CET a 6s, donde la PDR alcanza un valor de 89%. Cabe destacar que esta PDR, considerablemente cercana a la de CBF, se obtiene con una sobrecarga de enrutamiento mucho menor, como se demuestra observando las Figuras 3 y 6. Al utilizar un valor de R muy reducido combinado con valores de CET muy altos se provocan colisiones entre paquetes de enrutamiento y mensajes *beacon* de DiRCoD, lo cual conduce a una reducción de la PDR. En términos de sobrecarga útil, la Figura 4c) muestra que con una adecuada combinación de los parámetros de diseño, TOPOCBF reduce hasta un 21% la sobrecarga útil de CBF

V. CONCLUSIONES

Los protocolos de enrutamiento en entornos vehiculares han evolucionado hacia enfoques que seleccionan los caminos de enrutamiento de forma dinámica considerando la información de tráfico en tiempo real. Para evitar los costes de implementación y de sobrecarga de comunicaciones necesarios para la estimación de las densidades vehiculares, los autores de este artículo proponen basar las decisiones de enrutamiento en el nivel de conectividad *multi-hop* de las calles. En este contexto, se ha presentado TOPOCBF, un protocolo que utiliza un esquema de retransmisión del tipo *contention-based* y que utiliza estimaciones de la conectividad *multi-hop* de las calles para elegir dinámicamente los caminos de retransmisión. El artículo ha investigado además como configurar eficientemente el protocolo TOPOCBF para maximizar su rendimiento y su eficiencia de comunicaciones. Los resultados obtenidos han demostrado que el esquema propuesto puede obtener unas altas tasas de entrega de paquetes limitando a su vez la sobrecarga generada por el encaminamiento *multi-hop*.

Los autores se plantean como trabajo futuro una evolución de la técnica TOPOCBF para mejorar su eficiencia en la utilización del canal de comunicaciones. También se estudiará la viabilidad de TOPOCBF en diferentes escenarios de tráfico y con distintos parámetros de comunicaciones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio a través del proyecto INTELVEIA (número de referencia: TSI-020302-2009-90), y por la Comisión Europea a través del proyecto FP7 iTETRIS: An Integrated Wireless and Traffic Platform for Real-Time Road Traffic Management Solutions (número del proyecto: FP7 224644). Los autores desean agradecer el apoyo recibido.

REFERENCIAS

- [1] ETSI TC ITS, "Intelligent Transport Systems (ITS); European profile standard on the physical and medium access layer of 5 GHz ITS", Standard ETSI ES 202 663 v1.1.0, Jan. 2010
- [2] 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 v0.1.1, Febr. 2011
- [3] B. Karp and H. T. Kung, "GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks", Proc. of the ACM/IEEE 6th annual international conference on mobile computing and networking, MOBICOM'00, pp. 243-254, Aug. 2000
- [4] H. Fussler, J. Widmer, M. Kasemann, M. Mauve, and H. Hartenstein, "Contention-based forwarding for mobile ad hoc networks", Ad Hoc Networks, Elsevier, vol. 1, issue 4, pp.351-369, Nov. 2003
- [5] J. Gozalvez, M. Sepulcre, and R. Bauza, "Impact of the radio channel modelling on the performance of VANET communication protocols", Telecommunication Systems, Springer, pp. 1-19, 2010
- [6] J. Tian, L. Han, K. Rothermel, "Spatially aware packet routing for mobile ad hoc inter-vehicle radio networks", Proc. of IEEE Intelligent Transportation Systems 2003, vol.2, pp. 1546- 1551, Oct. 2003
- [7] J. Zhao, G. Cao, "VADD: Vehicle-Assisted Data Delivery in Vehicular Ad Hoc Networks", IEEE Transactions on Vehicular Technology , vol.57, no.3, pp.1910-1922, May 2008
- [8] K.C. Lee, M. Le, J. Harri, M. Gerla, "LOUVRE: Landmark Overlays for Urban Vehicular Routing Environments," Proc. of the 68th IEEE Vehicular Technology Conference VTC Fall 2008, pp.1-5, Sept. 2008
- [9] Y. Ding, C. Wang, and L. Xiao, "A static-node assisted adaptive routing protocol in vehicular networks", Proc. of the 4th ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks, pp. 59-68, 2007
- [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", Proc. of the IEEE 66th Vehicular Technology Conference, VTC-2007 Fall, pp.2086-2090, Oct. 2007
- [12] H. Fussler, H. Hartenstein, J. Widmer, M. Mauve, and W. Effelsberg, "Contention-based Forwarding for Street Scenarios", Proc. Of the 1st International Workshop in Intelligent Transportation, March 2004
- [13] Tonghong Li, Yuanzhen Li, Jianxin Liao, "A Contention-Based Routing Protocol for Vehicular Ad Hoc Networks in City Environments", Proc. of the 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems, pp.482-487, June 2009
- [14] A. Ho, Y.H. Ho, K.A. Hua, "A connectionless approach to mobile ad hoc networks in street environments", Proc. of Intelligent Vehicles Symposium 2005, pp. 575- 582, June 2005
- [15] P. M. Ruiz, V. Cabrera, J. A. Martinez, F. J. Ros, "BRAVE: Beaconless Routing Algorithm for Vehicular Environments", Proc. Of Second IEEE International Workshop on Intelligent Vehicular Networks (InVeNet 2010), November 2010
- [16] M. Rondinone and J. Gozalvez, "Distributed and Real Time Communications Road Connectivity Discovery through Vehicular Ad-hoc Networks", Proc. of the 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, pp.1079-1084, Sept. 2010
- [17] GeoNet Consortium, "D2.2 Final GeoNet Specification", Jan. 2010
- [18] "Highway Capacity Manual - HCM 2000", Transportation Research Board, National Research Council, 2000
- [19] Skycomp, Inc., Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas, Inc., "Performance Ratings of Traffic Flows on Selected New York Metropolitan Area Highways Fall 2007", 2007
- [20] WINNER consortium, "D1.1.2. WINNER II channel models", WINNER European Research project Public Deliverable, Sept. 2007