

PROCOLOS PARA COMUNICACIONES MÓVILES VEHICULARES MULTIHOP

Javier Gozalvez Sempere

Doctor en Comunicaciones Móviles. Ingeniero Electrónico, especialidad Telecomunicaciones.
Profesor Contratado Doctor. Director del laboratorio Uwicore. Universidad Miguel Hernández

Ramón Bauzá Francés

Ingeniero de Telecomunicación
Investigador contratado. Universidad Miguel Hernández

Miguel Sepulcre Ribes

Ingeniero de Telecomunicación
Investigador contratado. Universidad Miguel Hernández

Datos de contacto

Uwicore, Ubiquitous Wireless Communications Research Laboratory, <http://www.uwicore.umh.es>

Universidad Miguel Hernández

Avda. de la Universidad s/n (Edificio Torrepinet), 03202. Elche, España

Tel.: 96.665.8955, Fax: 96.665.8903

j.gozalvez@umh.es

RESUMEN:

Los sistemas de comunicaciones móviles vehiculares constituyen una prometedora tecnología para la reducción de accidentes y la mejora de la movilidad vial. Con estos sistemas, cada vehículo intercambiará periódicamente información sobre su posición y velocidad con otros vehículos y elementos de infraestructura cercanos, con lo que podrá advertir situaciones adversas fuera del campo visual del conductor. La transmisión de información podrá realizarse no solo directamente entre vehículos próximos, sino también entre vehículos lejanos mediante mecanismos de encaminamiento multihop, empleando vehículos intermedios como nodos retransmisores. El presente artículo analiza el rendimiento y la eficiencia de distintos protocolos de encaminamiento multihop y demuestra la necesidad de emplear técnicas de transmisión adaptativas para garantizar la fiabilidad y escalabilidad de las comunicaciones vehiculares.

1. INTRODUCCIÓN

La seguridad y la movilidad en las carreteras son dos importantes retos a los que la sociedad se enfrenta actualmente, dado el elevado coste humano y económico de los accidentes y las situaciones de congestión, unido al continuo incremento del número de vehículos en circulación. Con el principal objetivo de afrontar dichos retos, importantes iniciativas y proyectos internacionales se están llevando a cabo para el desarrollo de sistemas de comunicaciones móviles vehiculares. Estos sistemas constituyen una prometedora tecnología ITS (*Intelligent Transportation System*) para la reducción de accidentes y la mejora de la movilidad vial, y además posibilitarán la conectividad a Internet en movimiento. Este tipo de aplicaciones y servicios de seguridad vial y confort serán posibles gracias al intercambio directo y continuo de información entre vehículos (V2V, *Vehicle-to-Vehicle*) y entre vehículos e infraestructura (V2I, *Vehicle-to-Infrastructure*). Con estos sistemas, cada vehículo intercambiará periódicamente información sobre su posición y velocidad con vehículos y otros nodos de red cercanos, y podrá detectar situaciones adversas con tiempo suficiente para advertir al conductor y, de esta manera, eludir la situación de peligro. La transmisión de información podrá realizarse tanto directamente entre vehículos próximos entre sí, como también entre vehículos lejanos empleando mecanismos de encaminamiento multihop, que utilizan vehículos intermedios como nodos retransmisores de información (ver Figura 1). Dichos mecanismos se encargan de determinar qué ruta o vehículos intermedios seguirán los paquetes datos para llegar desde el origen hasta el destino final. Mediante estos mecanismos, cualquier vehículo podrá ser avisado de una situación adversa que pueda afectar a su seguridad o a la ruta que pretendía utilizar para alcanzar su destino, como por ejemplo un atasco o riesgo inminente de accidente.

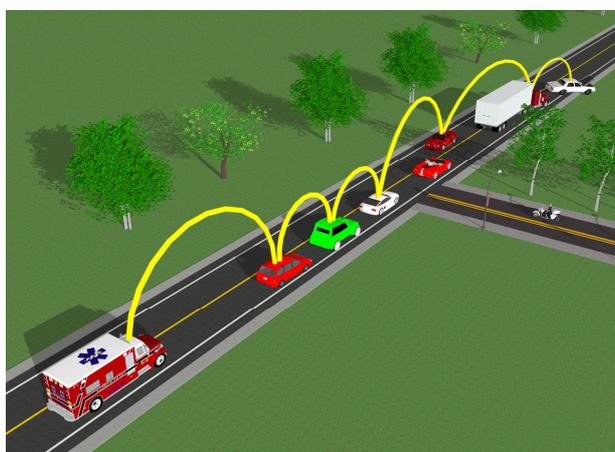


Figura 1. Comunicaciones móviles vehiculares multihop (Fuente: DLR).

A pesar de sus enormes posibilidades, el desarrollo de sistemas de comunicaciones móviles vehiculares presenta diversos retos tecnológicos derivados de su escenario de operación (elevada movilidad de los nodos, movimiento restringido a la red vial, condiciones de propagación hostiles, etc.) y de los estrictos requisitos que imponen las aplicaciones vehiculares, como la necesidad de comunicaciones con bajo retardo y elevada fiabilidad. Por ello, es necesario el diseño de protocolos de comunicación que presenten elevados niveles de fiabilidad y robustez, además de una alta flexibilidad para poder operar en los diversos escenarios y condiciones de operación característicos del entorno vehicular. Por otro lado, los protocolos deberán garantizar la futura escalabilidad del sistema a medida que las tecnologías inalámbricas vehiculares sean introducidas, y ello requerirá que no solo garanticen los niveles de calidad de servicio (QoS, *Quality of Service*) de las aplicaciones, sino que también empleen de forma eficiente el canal de comunicaciones con el fin de reducir la congestión y favorecer la escalabilidad del sistema.

En este contexto, el presente trabajo analiza y evalúa diversos protocolos de comunicación V2V bajo condiciones de propagación radio y movimiento vehicular realistas. En primer lugar, se estudia el rendimiento y la eficiencia de varios protocolos de encaminamiento multihop existentes bajo distintas densidades de tráfico. Dicho estudio permitirá determinar qué tipo de protocolos se adapta mejor al entorno vehicular y, en base a sus posibles deficiencias, diseñar nuevos protocolos que mejoren el rendimiento de los ya existentes. En segundo lugar, dado que el encaminamiento multihop depende en última instancia de cada una de las transmisiones individuales (hops), para mejorar su rendimiento es necesario aumentar la fiabilidad y robustez de dichas transmisiones pero de forma eficiente y escalable. Así, en este trabajo es analizado el potencial de técnicas de transmisión adaptativas para garantizar la validez de las comunicaciones V2V y su escalabilidad.

2. PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN EN REDES VEHICULARES

En la actualidad, diversas iniciativas de estandarización internacionales se están llevando a cabo para el desarrollo de un estándar global de comunicaciones móviles vehiculares. Entre ellas destacan el IEEE 802.11p/WAVE/1609 (*Wireless Access in Vehicular Environments*) y el ISO TC204 WG16 (CALM, *Continuous Air interface for Long and Medium range*).

El estándar 802.11p [1] constituye una adaptación de la norma 802.11a (WiFi) al entorno vehicular y será el comúnmente empleado para la comunicación directa entre vehículos. Así, abarca las capas MAC (*Medium Access Control*) y física (PHY) de la pila de protocolos, haciendo uso de siete canales no solapados de 10MHz en la banda de 5.9GHz. Mientras

seis de ellos son canales de servicio empleados para aplicaciones de seguridad vial y privadas, el canal central denominado canal de control es utilizado en modo ad-hoc como canal de referencia para la detección inicial de vehículos y el establecimiento de todas las comunicaciones. La familia de estándares WAVE 1609 [2] complementa la norma 802.11p, definiendo aspectos adicionales como mecanismos de seguridad (privacidad, autenticación, etc.), servicios de red y operaciones multi-canal.

Por otro lado, la tarea del ISO TC204 WG16 [3] se centra en el desarrollo de una familia de estándares para definir una arquitectura de sistema global completa, empleando diversos protocolos y sistemas de comunicación, con el objetivo de proporcionar una solución que permita comunicaciones V2V y V2I continuas (o casi continuas). Entre los protocolos considerados en CALM destaca la adaptación de los propios 802.11p/1609 (bajo el acrónimo CALM-M5) a la arquitectura CALM, los protocolos de comunicaciones celulares 2G y 3G, y protocolos de comunicaciones inalámbricas de banda ancha como IEE802.16e (WiMAX), entre otros.

3. ENTORNO DE EVALUACIÓN

El análisis del rendimiento de los protocolos de comunicación ha sido llevado a cabo en un escenario urbano por sus problemas de accidentalidad (intersecciones) y movilidad, y dado que la mayor presencia de obstáculos en estos entornos provoca que las condiciones de propagación de la señal radio sean más desfavorables que en otro tipo de entornos como autopistas o carreteras convencionales.

Para llevar a cabo la presente investigación, se ha implementado una plataforma *software* de simulación de comunicaciones móviles vehiculares basada en el simulador de redes de código abierto ns2 (<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>). Dicha plataforma implementa los distintos protocolos de comunicaciones analizados y, además, modela de forma detallada diversos aspectos cuya influencia suele subestimarse en este tipo de estudios: la propagación radio y el movimiento característico de los vehículos.

Por un lado, con el fin de modelar adecuadamente los efectos del canal radio, la plataforma de simulación desarrollada implementa a nivel de sistema el modelo de canal radio para entornos micro-celulares desarrollado en el proyecto WINNER [4]. Aunque este modelo no representa fielmente el entorno vehicular V2V al no contemplar antenas transmisora y receptora a alturas idénticas, este modelo micro-celular es el que mejor se aproxima actualmente al entorno bajo estudio. Es importante destacar que hasta la fecha no se han

desarrollado o publicado modelos de propagación radio exclusivos para el entorno vehicular. Este modelo considera tanto las pérdidas básicas de propagación o *pathloss*, como los efectos probabilísticos del desvanecimiento correlado (correlación introducida mediante el modelo de Gudmundson [5]) y las pérdidas por multitrayecto (*multipath fading*), diferenciando las situaciones en las que transmisor y receptor presentan visión directa (LOS, *Line of Sight*) de las que no (NLOS, *Non-Line of Sight*). Además de los efectos mencionados, para reducir la complejidad de las simulaciones a nivel de sistema, la emulación del nivel físico del canal de control 802.11p/WAVE se ha implementado mediante curvas de PER (*Packet Error Rate*), que reflejan el rendimiento del modo de transmisión del canal de control WAVE.

Por otro lado, dada la importancia que el modelado de la movilidad de los vehículos puede ejercer sobre el rendimiento del sistema, el presente trabajo también utiliza la herramienta de simulación de tráfico SUMO (*Simulation of Urban Mobility*, <http://sumo.sourceforge.net/>) para obtener patrones de movimiento de los vehículos y poder, de este modo, analizar el rendimiento de los protocolos en entornos realistas. SUMO es un *software* gratuito de código abierto implementado en C++ y desarrollado por el Centro de Informática Aplicada (ZAIK) y el Instituto de Investigación de Transporte del Centro Aeroespacial Alemán (DLR). El simulador SUMO implementa un modelo de tráfico microscópico continuo en espacio y discreto en tiempo. SUMO presenta la posibilidad de definir diferentes tipos de vehículos en una misma simulación (diferente aceleración, velocidad y tamaño), implementa servicios de transporte público y permite simular intersecciones basadas en normas de prioridad (misma prioridad para todas las bifurcaciones, prioridad de las calles principales respecto a las secundarias, etc.) o por semáforos, entre otras características.

4. PROTOCOLOS DE ENCAMINAMIENTO MULTIHOP EN ENTORNOS VEHICULARES

En general, existen diversos tipos de protocolos de encaminamiento multihop diseñados para redes inalámbricas. Sin embargo, las especiales características de las redes vehiculares hacen que muchos de ellos no sean viables para el entorno vehicular, fundamentalmente por la elevada movilidad de los nodos. Diversos trabajos han demostrado que en redes vehiculares los protocolos de encaminamiento basados en la posición geográfica de los nodos para el establecimiento de las rutas entre el nodo origen y el destino presentan notables beneficios frente a los protocolos tradicionales basados en la topología de la red [6]. En estos protocolos el proceso de encaminamiento de los paquetes entre origen y destino está basado en la posición de los nodos de la red (cada nodo obtiene su

posición mediante algún sistema de posicionamiento como GPS o Galileo). El presente trabajo estudia el rendimiento de tres de los protocolos de encaminamiento multihop basados en la posición más empleados, con el objetivo de analizar sus principales deficiencias en el entorno vehicular y proponer y analizar posibles mejoras para obtener un óptimo rendimiento de la forma más eficiente posible.

4.1. Descripción de los protocolos multihop analizados

Uno de los protocolos estudiados en el presente trabajo es el denominado GPSR (*Greedy Perimeter Stateless Routing*) [7] por ser uno de los protocolos más empleados como referencia en estudios de redes móviles vehiculares. GPSR, para llevar a cabo el enrutamiento de los paquetes de datos desde un nodo origen hacia un determinado destino, no establece de antemano una ruta por la cual circularán todos los paquetes, sino que cada nodo intermedio decide hacia qué nodo encaminará cada paquete recibido en base a la localización del destino final y la posición de sus nodos vecinos (los nodos vecinos son aquellos con los que un determinado nodo puede comunicarse directamente y de los cuales obtiene su posición a través de la transmisión periódica de paquetes de datos denominados *beacons*). Para tomar esta decisión GPSR distingue dos modos de encaminamiento: *greedy forwarding* y *perimeter forwarding*. Con el primer modo (el empleado por defecto) el nodo transmite el paquete de datos a su nodo vecino que más cerca se encuentre del destino, de forma que el paquete se irá aproximando progresivamente al destino final. Sin embargo, cuando un nodo no tenga ningún vecino más próximo al destino que él mismo, cambiará el modo de enrutamiento a *perimeter forwarding* e intentará encaminar el paquete de datos de manera que bordee la zona en la que no había ningún nodo disponible. Independientemente del modo de encaminamiento empleado, el proceso se repite en cada nodo retransmisor hasta que el paquete alcanza el nodo destino.

Los protocolos basados en la posición como GPSR normalmente muestran problemas de enrutamiento en escenarios con presencia de edificios, obstáculos, bifurcaciones e intersecciones, al no tener en cuenta la topología de la red viaria en la selección de los nodos retransmisores y presentar la posibilidad de que los paquetes se encaminen por vías que no se dirigen hacia el destino final. Para eliminar dicha posibilidad y mejorar el rendimiento de estos protocolos, en [8] se propone el protocolo SAR (*Spatially Aware Routing*). En este protocolo, el nodo origen obliga a los paquetes que genera a pasar por determinadas intersecciones en su camino hacia el destino final. Estas intersecciones

intermedias habitualmente se seleccionan siguiendo el camino más corto entre origen y destino, información que puede extraerse de mapas digitales.

Tanto GPSR como SAR son protocolos de encaminamiento *unicast* puesto que cada paquete que se retransmite va dirigido hacia un nodo específico y solo dicho nodo podrá recibirlo y retransmitirlo de nuevo. En los protocolos *unicast*, cada nodo decide quién será el próximo nodo encargado de retransmitir cada paquete de datos en base a las posiciones de los nodos bajo su rango de cobertura. Sin embargo, debido a la elevada movilidad de los vehículos la información sobre el posicionamiento de dichos nodos puede encontrarse frecuentemente obsoleta, decrementando el rendimiento de los protocolos (nodos retransmisores no seleccionados de forma óptima o incluso fuera del rango de cobertura). Para solventar esta problemática se propuso el protocolo CBF (*Contention Based Forwarding*) [9]. Con CBF cada nodo retransmisor transmite el paquete de datos en modo *broadcast*, sin ningún nodo específico como destinatario. Para determinar qué nodo será el próximo retransmisor, todos los nodos vecinos que reciban correctamente dicho paquete inician un temporizador cuya duración es proporcional a su distancia al destino final. De esta manera, el temporizador del nodo ubicado más cerca del destino final será el que expire en primer lugar y dicho nodo será el que retransmita el paquete de datos. Cuando el resto de nodos reciban dicha retransmisión, cancelarán sus respectivos temporizadores para no retransmitir el paquete por duplicado.

4.2. Evaluación de protocolos multihop en entornos urbanos

El escenario urbano concreto empleado en la evaluación de los protocolos de encaminamiento multihop descritos es ilustrado en la Figura 2. Todas las calles presentan dos carriles, uno en cada sentido, excepto las calles horizontales del centro del escenario que presentan 4 carriles, dos en cada sentido. Todas las intersecciones están reguladas por prioridad (cesión del paso a los vehículos de la derecha) excepto las intersecciones de las calles de 4 carriles que están reguladas por semáforos. En dicho escenario, todos los vehículos en circulación transmiten periódicamente *beacons* para informar a sus nodos vecinos de su posición cada 0.1s sobre el canal de control WAVE utilizando el modo de transmisión de 6Mbps definido para dicho canal y una potencia de transmisión constante de 0.5W. En dos puntos del escenario han sido fijadas las posiciones de los nodos origen y destino para la transmisión multihop, en la que el nodo origen genera un paquete de datos cada 3s.

El análisis del rendimiento general de los protocolos de enrutamiento ha sido realizado considerando diferentes densidades de tráfico. La Figura 3 ilustra el porcentaje de paquetes de datos que consiguen ser encaminados correctamente hasta el destino final para los tres protocolos estudiados en función de la densidad de tráfico. Como muestran los resultados obtenidos, el protocolo que mejor rendimiento ofrece es CBF con tasas de recepción cercanas al 100% en densidades de tráfico media, alta y muy alta. El rendimiento de CBF es siempre mayor que el ofrecido por el resto de protocolos independientemente de la densidad de tráfico considerada, aunque CBF presenta una menor eficiencia debido a que los paquetes de datos se transmiten en modo *broadcast*.

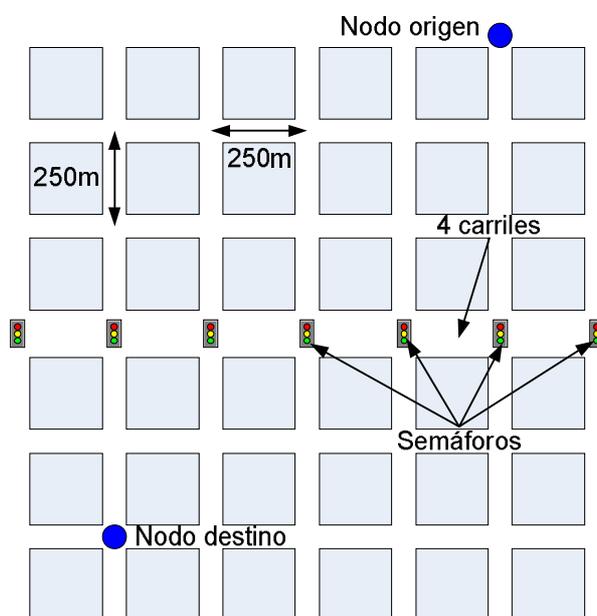


Figura 2. Escenario urbano analizado.

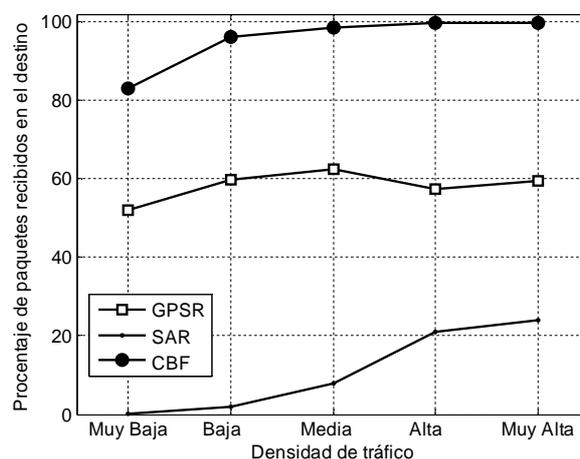


Figura 3. Porcentaje de paquetes recibidos en el destino en función de la densidad de tráfico.

En cuanto a los protocolos *unicast* (GPSR y SAR), es de destacar que GPSR ofrece un rendimiento relativamente uniforme independientemente de la densidad de tráfico. En cambio, el protocolo SAR, que obliga a los paquetes a ser encaminados por la ruta más corta entre origen y destino, presenta un pobre rendimiento, logrando una máxima tasa de paquetes recibidos en el destino final del 24% cuando la densidad de tráfico es muy alta. El análisis detallado de estos protocolos permitirá determinar las causas por las que el rendimiento de los protocolos *unicast* es notablemente inferior al del protocolo *broadcast* (CBF). El estudio pormenorizado del protocolo CBF permitirá también analizar algunos problemas de eficiencia generados por las transmisiones *broadcast*, a pesar de su elevado rendimiento.

La Figura 4 detalla el rendimiento de los protocolos *unicast* estudiados en función de la densidad de tráfico. La figura clasifica en tres categorías los paquetes de datos que han intentado encaminarse hacia el destino en función de si han sido correctamente recibidos por el nodo destino, han sido perdidos en algún punto del recorrido a nivel de ruteo (descartados por algún nodo intermedio al no encontrar ningún nodo vecino al que poder transmitir el paquete de datos) o a nivel MAC/PHY (descartados por errores en la propagación radio o interferencias). Como puede observarse en la Figura 4a, independientemente de la densidad de tráfico, la pérdida de paquetes a nivel MAC/PHY es la causa principal que imposibilita a GPSR entregar correctamente los paquetes de datos en el destino. De hecho, el porcentaje de paquetes perdidos a nivel de ruteo por no encontrar ningún nodo vecino disponible se reduce a medida que la densidad vehicular aumenta, llegando a un nivel considerablemente bajo para densidades de tráfico muy elevadas. Por el contrario, la Figura 4b muestra que cuando se obliga a los paquetes a ser encaminados por ciertas intersecciones intermedias hasta alcanzar el destino (protocolo SAR), el porcentaje de paquetes recibidos en el destino disminuye fundamentalmente por la pérdida de paquetes a nivel de ruteo. En efecto, al encaminar los paquetes por la ruta más corta entre origen y destino (ver Figura 5b), esta no es siempre la de mayor densidad vehicular. De hecho, como muestra la Figura 6, la cantidad de nodos vecinos que presenta cada nodo retransmisor empleando SAR disminuye considerablemente respecto a la obtenida con GPSR. Aunque el porcentaje de paquetes recibidos en el destino aumenta con la densidad del tráfico vehicular, es considerablemente inferior al obtenido con el resto de protocolos.

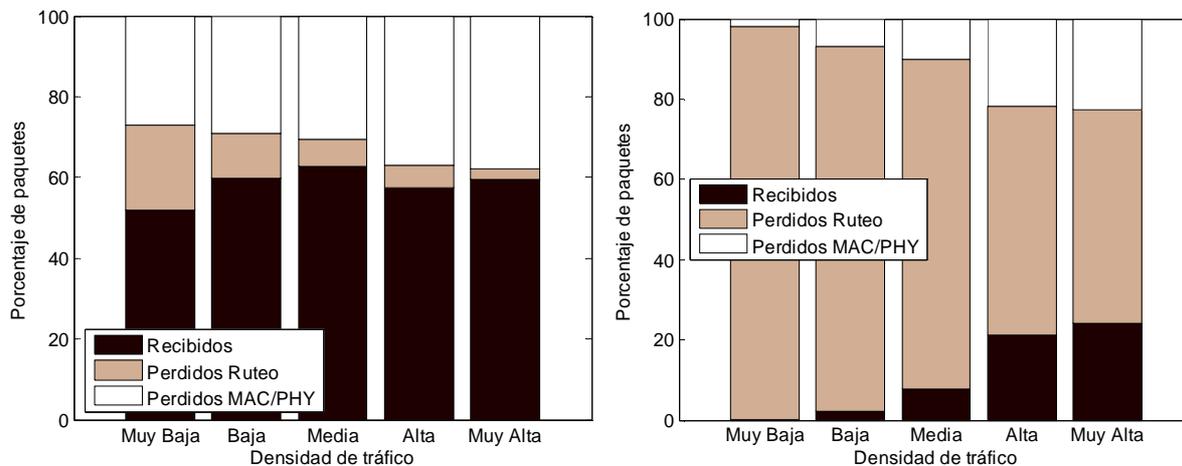


Figura 4. Distribución de los paquetes de datos recibidos y perdidos. (a) GPSR. (b) SAR.

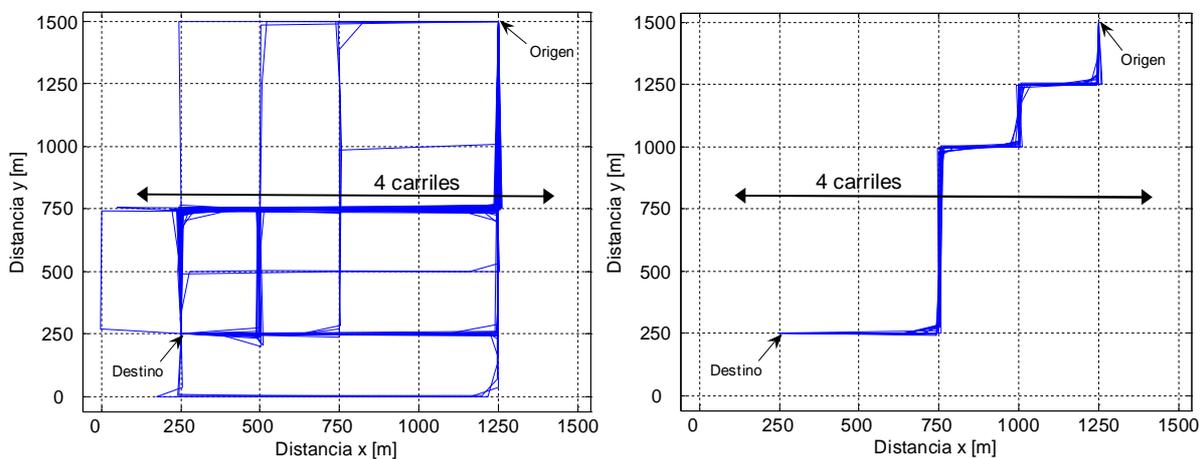


Figura 5. Ilustración del camino que trazan los paquetes en su trayecto al destino. (a) GPSR. (b) SAR.

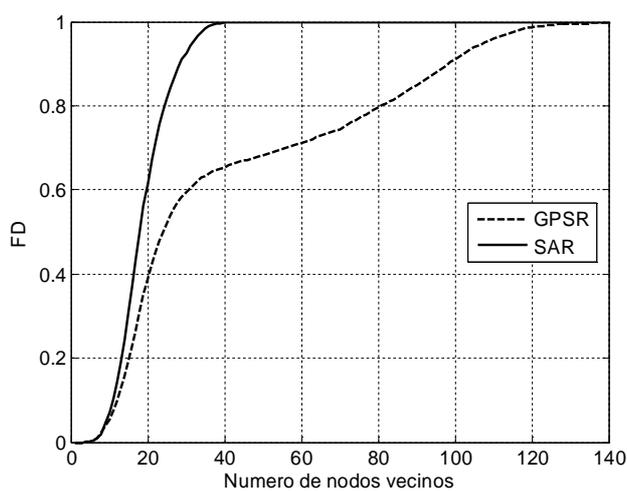


Figura 6. Función de Distribución (FD) del número de nodos que mantiene cada nodo retransmisor en densidad de tráfico media.

El análisis del rendimiento de los protocolos *unicast* ha permitido identificar los distintos problemas a los que se enfrentan para alcanzar un óptimo rendimiento. Dichos problemas afectan en menor medida al protocolo *broadcast* CBF puesto que, como muestra la Figura 3, dicho protocolo consigue una tasa de paquetes de datos correctamente recibidos en el destino mayor que la de los protocolos *unicast* independientemente de la densidad del tráfico vial considerada. Sin embargo, el empleo de mensajes *broadcast* para conseguir dicho objetivo no realiza un uso eficiente del canal radio porque los paquetes de datos son transmitidos en modo *broadcast* y además pueden alcanzar el destino replicados por múltiples rutas. En efecto, cuando un vehículo retransmite un paquete de datos y se encuentra cerca de una intersección, dicho paquete será habitualmente recibido por vehículos ubicados en cada una de las calles que se unen en dicha intersección (dichos vehículos receptores presentan condiciones de propagación radio con visibilidad directa con el vehículo transmisor). Al ser un paquete *broadcast* (no dirigido a un vehículo específico), todos los vehículos que lo reciban serán candidatos para su retransmisión y el paquete podrá ser duplicado y encaminado por varias calles al mismo tiempo. La Figura 7 ilustra los trayectos que podrían seguir las diferentes réplicas de un mismo paquete de datos al dirigirse hacia el destino. En el ejemplo representado en dicha figura, el destino recibe tres réplicas diferentes de un mismo mensaje a través de diferentes rutas.

Como muestra la Tabla 1, el número de réplicas recibidas en el destino es además dependiente de la densidad de tráfico vial considerada. Cuanto mayor es la densidad de tráfico, mayor es la cantidad de mensajes duplicados que alcanzan el destino. Cabe destacar que la desviación típica del número de réplicas disminuye ligeramente cuando la densidad de tráfico es elevada. Esto es así porque el número de réplicas recibidas cuando el tráfico es menos denso está determinado por la distribución del tráfico en un momento dado y por tanto, el número de réplicas recibidas es más variable que cuando es considerado un tráfico vial más denso. Por otro lado, es de esperar que a medida que el número de intersecciones aumente entre origen y destino, exista una mayor posibilidad de que un paquete sea duplicado y de que aumente la cantidad de réplicas recibidas en el destino, incrementando así la congestión y decreciendo la eficiencia de uso del canal radio.

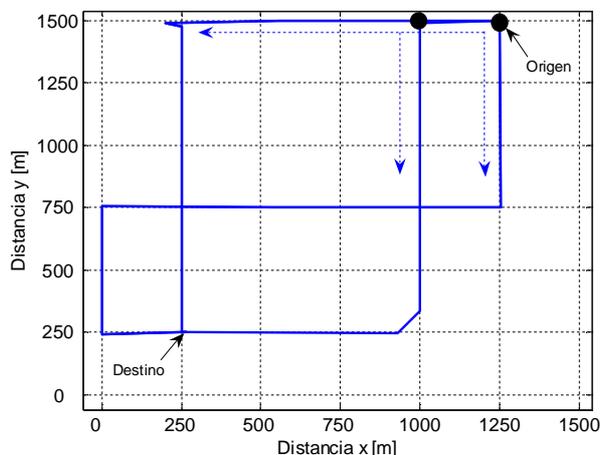


Figura 7. Trayectos hacia el destino que siguen las réplicas de un mismo mensaje de datos en el protocolo CBF. Círculos negros: intersecciones donde son duplicados mensajes.

Parámetro	Densidad de tráfico				
	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Número medio de réplicas recibidas	2.95	3.35	3.54	3.72	3.84
Desviación típica del número de replicas recibidas	1.31	1.33	1.30	1.28	1.27

Tabla 1. Réplicas de un mismo paquete de datos recibidas en el destino empleando CBF.

4.3. Mejora de rendimiento de protocolos *unicast*

El estudio sobre protocolos de encaminamiento multihop realizado ha permitido identificar las principales problemáticas a las que se enfrenta cada uno de los protocolos. Empleando el protocolo *unicast* GPSR los paquetes de datos no alcanzan el destino debido fundamentalmente a errores en la propagación radio e interferencias (errores MAC/PHY). Por el contrario, el protocolo *unicast* SAR presenta un pobre rendimiento debido principalmente a que los paquetes de datos son encaminados por el trayecto más corto entre origen y destino y, en este caso, es perjudicial al ser un trayecto con múltiples giros en intersecciones (las intersecciones son difíciles de superar al bloquear los edificios la propagación) y con menor densidad vehicular. Estos problemas aparecen en menor medida en el protocolo *broadcast* CBF, que presenta un rendimiento muy superior independientemente de la densidad de tráfico. Sin embargo, como se ha demostrado, dicho protocolo presenta problemas de eficiencia por emplear transmisiones de tipo *broadcast* y puesto que los paquetes de datos pueden ser recibidos múltiples veces en el destino.

En base a este análisis, se han diseñado diversos mecanismos para protocolos de encaminamiento multihop *unicast*, que tratan de paliar los problemas descritos y obtener un rendimiento óptimo de forma eficiente. Como muestran los resultados de la Figura 8, estos nuevos mecanismos permiten que los protocolos *unicast* alcancen el rendimiento del protocolo *broadcast* CBF. Como puede observarse, dichos mecanismos garantizan cerca de un 98% de fiabilidad de los protocolos de encaminamiento multihop en entornos vehiculares, pero sin la pérdida de eficiencia que presentan las transmisiones *broadcast*, al ser de tipo *unicast*, con lo que suponen una mejora de la capacidad y escalabilidad del sistema.

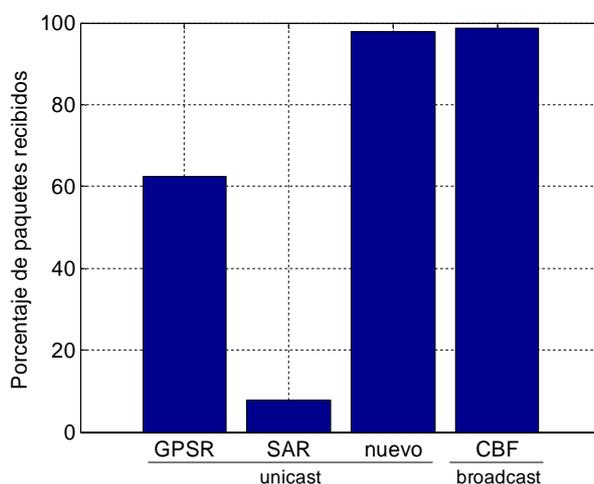


Figura 8. Porcentaje de paquetes recibidos correctamente en el destino con densidad de tráfico media y distintos protocolos.

5. TÉCNICAS DE TRANSMISIÓN ADAPTATIVAS

Los protocolos de encaminamiento multihop dependen en última instancia de cada una de las transmisiones realizadas entre los distintos vehículos entre origen y destino. En función de las transmisiones de los propios *beacons* y los paquetes de datos, el rendimiento de los protocolos de encaminamiento multihop puede variar. Por ello es necesario también el desarrollo de mecanismos de transmisión que garanticen la fiabilidad de dichas transmisiones, cumpliendo el nivel de QoS requerido y de forma eficiente.

Diversos trabajos han demostrado que el empleo de mecanismos de transmisión adaptativos basados en las condiciones específicas de operación de los vehículos mejoran el rendimiento del sistema [10]. Por ejemplo, diversos trabajos proponen la adaptación de la potencia de transmisión para mitigar las interferencias o mantener la conectividad de la red. Sin embargo, la mayor parte de las políticas de transmisión adaptativas propuestas se centran en la operación a nivel de sistema y no consideran de forma adecuada los requisitos

de QoS instantáneos de las aplicaciones de tráfico. Dichos requisitos son especialmente exigentes en aplicaciones de seguridad vial, que requieren la máxima fiabilidad en las transmisiones, por lo que dichas aplicaciones representan el caso más crítico. En este contexto, los autores propusieron en [11] el mecanismo OPRAM (*OPportunistic-driven adaptive RAdio resource Management*) con el propósito de garantizar los estrictos requisitos de QoS de las aplicaciones empleando de forma eficiente el canal radio. El presente trabajo demuestra su rendimiento y eficiencia de uso del canal radio a nivel de sistema considerando escenarios de tráfico realistas.

5.1. Mecanismo de transmisión adaptativo OPRAM

La técnica OPRAM fue diseñada con el principal objetivo de satisfacer los estrictos requisitos de QoS de las aplicaciones vehiculares empleando de forma eficiente el canal radio. OPRAM es una política de transmisión adaptativa que modifica los parámetros de comunicación de los vehículos en base a su velocidad y su distancia a una posible zona de conflicto/interés. Esta adaptación se realiza de manera descentralizada y puede basarse en la información proporcionada por mapas digitales, por vehículos cercanos o cualquier otra fuente.

Como muestra [11] para aplicaciones de seguridad vial, OPRAM adapta la potencia de transmisión y la tasa de transmisión de mensajes solo en una pequeña región denominada RA (Región del Algoritmo) inmediatamente anterior a la distancia crítica (DC). Esta distancia crítica es la mínima distancia a una zona de posible accidente a la que debería recibirse un mensaje de alerta para que el conductor pudiese frenar a tiempo y evitar una colisión. DC depende de parámetros como la velocidad de desplazamiento, el tiempo de reacción del conductor (TR) o la deceleración de emergencia aplicable por el vehículo. Uno de los escenarios objetivo de la aplicación de esta técnica son las intersecciones (ver Figura 9a), donde se producen cerca del 15% de los accidentes en España y más del 20% en Estados Unidos.

Mediante la modificación de los parámetros de comunicación en RA, el objetivo de OPRAM es garantizar la correcta recepción de al menos un mensaje *broadcast* de seguridad vial, procedente de un vehículo con el que existe posibilidad de accidente, antes de DC en el 99% de los casos. Como ilustra la Figura 9a, OPRAM transmite N_T mensajes *broadcast* de seguridad vial en RA con la potencia de transmisión necesaria para que todos y cada uno de ellos se reciban con una probabilidad p_e constante. Según se detalla en [11], el valor de p_e

se calcula para que al menos uno de los N_T mensajes transmitidos en RA sea recibido correctamente por un vehículo que se encuentre aproximándose a la intersección y con riesgo de accidente. En la Figura 9a puede observarse que para garantizar la misma probabilidad de recepción para cada uno de los N_T mensajes *broadcast* de seguridad vial se requieren diferentes niveles de potencia de transmisión. Fuera de RA, los vehículos transmiten con una potencia constante de 250mW y una tasa de 10 paquetes/s con el fin de mantener una adecuada comunicación con los posibles vehículos que se pudieran encontrar en su misma calle (condiciones de propagación con visibilidad directa o LOS) en un rango de 150m. Dichos valores de potencia y tasa de transmisión han sido calculados para cumplir los requisitos marcados para aplicaciones definidas como *Cooperative Collision Warning applications* [12].

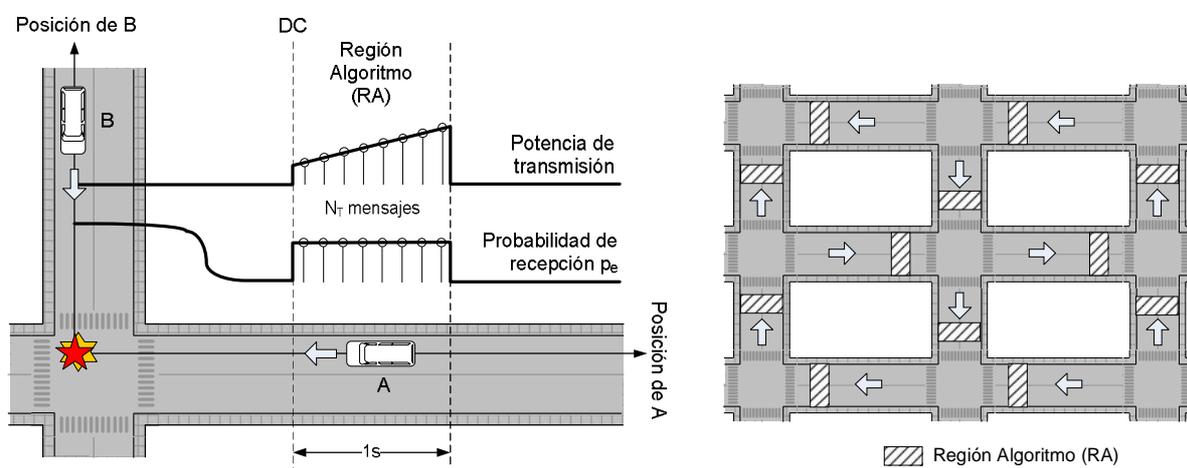


Figura 9. (a) Esquema conceptual del mecanismo OPRAM en intersecciones.
(b) Regiones RA para seguridad vial en escenarios urbanos.

Desde una perspectiva global, a nivel de sistema, uno de los principales beneficios derivados del uso de OPRAM es el control de la congestión del canal. De hecho, OPRAM mantiene los parámetros de comunicación de los vehículos al nivel mínimo para garantizar los niveles de QoS requeridos. Tal eficiente uso de los recursos mantendrá un adecuado control de la congestión de canal, que será también uno de los aspectos claves para garantizar la escalabilidad del sistema. Como ilustra la Figura 9b, únicamente los vehículos en RA que se aproximan a una intersección incrementarán su potencia de transmisión y/o tasa de transmisión de mensajes al emplear el mecanismo OPRAM. Fuera de la región RA, los recursos radio se mantienen en su nivel mínimo para garantizar una adecuada comunicación entre vehículos ubicados en la misma calle.

5.2. Evaluación del rendimiento de OPRAM

Con el objetivo de demostrar la viabilidad y los beneficios a nivel de sistema derivados del uso de políticas de transmisión adaptativas como OPRAM, a continuación se presenta la evaluación del sistema en un escenario urbano similar al empleado para el estudio de protocolos de encaminamiento multihop, pero esta vez formado por una cuadrícula uniforme de 15x15 edificios. Al igual que en el estudio de los protocolos multihop, todos los vehículos en el escenario transmiten periódicamente mensajes *broadcast* en el canal de control WAVE para aplicaciones de seguridad vial, donde todos los paquetes son transmitidos con una tasa de 6Mbps definida para el canal de control WAVE.

Para evaluar el rendimiento del sistema, se han considerado dos modelos de movilidad para los vehículos. Mediante el primer modelo, todos los vehículos se distribuyen uniformemente por el escenario con una densidad de 27 vehículos por kilómetro y se desplazan a una velocidad constante de 70km/h. Este escenario simplificado tiene como objetivo el análisis de la técnica de transmisión bajo la misma configuración para todos los vehículos, puesto que al considerar la misma velocidad de desplazamiento para todos los vehículos, todos presentarán el mismo valor de distancia crítica y, consecuentemente, los mismos valores de potencia de transmisión. Con el objetivo de analizar la técnica OPRAM en un escenario realista donde el movimiento de cada vehículo se vea influenciado por el tráfico cercano, el segundo modelo de movilidad considerado se basa en el simulador de tráfico SUMO empleado anteriormente para el estudio de los protocolos de encaminamiento multihop. En este caso la densidad vehicular es de 7 vehículos por kilómetro.

Para demostrar el adecuado funcionamiento de OPRAM y su eficiencia en la gestión del canal radio, su rendimiento ha sido comparado con el obtenido mediante políticas de transmisión con niveles de potencia constantes; en particular, se han considerado los niveles de potencia de transmisión de 0.25W y 2W. Según se comentó anteriormente, 0.25W es el umbral de potencia mínima requerida para que dos vehículos puedan comunicarse adecuadamente bajo condiciones de propagación LOS. En cambio, 2W es la potencia de transmisión necesaria para que dos vehículos que se aproximan a una intersección con riesgo de colisión intercambien al menos un mensaje *broadcast* de seguridad antes de alcanzar DC al menos en el 99% de los casos para una velocidad de $v=70\text{km/h}$ y $TR=0.75\text{s}$ (los valores analizados en este trabajo). En este caso, OPRAM ha sido configurado para que se transmitan $N_T=10$ paquetes en RA, que tiene una longitud temporal de 1 seg. Empleando la configuración de OPRAM propuesta en [11] y [13], y un mecanismo adicional para la compensación de los efectos negativos de la correlación del

canal radio sobre el rendimiento de OPRAM, el rendimiento de OPRAM en el escenario propuesto se muestra en la Figura 10. Como puede observarse, tanto OPRAM como el nivel de potencia fija de 2W son capaces de garantizar que el 99% de los vehículos reciban un mensaje de seguridad *broadcast* alertando del peligro antes de DC (dicho porcentaje viene representado en dicha gráfica como el porcentaje de vehículos que no reciben ningún paquete antes de DC). Por otro lado, el nivel de potencia fija de 0.25W reduce considerablemente el rendimiento de la aplicación de seguridad vial. Es importante destacar que OPRAM es capaz de alcanzar el mismo nivel de QoS en seguridad vial que una potencia de transmisión fija de 2W, pero empleando el nivel mínimo de potencia de transmisión fuera de RA. Consecuentemente, OPRAM reduce significativamente la ocupación y congestión del canal, mejorando las perspectivas de escalabilidad de la tecnología.

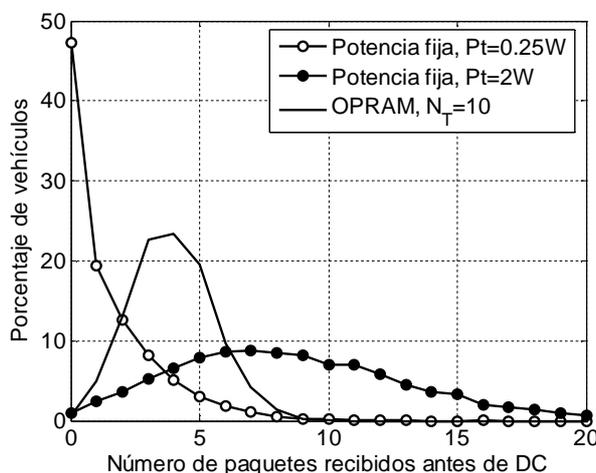


Figura 10. Distribución del número de mensajes recibidos antes de DC.

5.3. Análisis de eficiencia de OPRAM

Para demostrar la eficiencia de uso del canal radio mediante el empleo de la técnica OPRAM, se ha evaluado el rendimiento del sistema bajo los dos modelos de movilidad descritos anteriormente. En este contexto, es importante destacar que, a pesar del incremento en potencia de transmisión de OPRAM por encima de 2W dentro de RA, tal incremento solo afecta a un reducido porcentaje de los paquetes transmitidos en el escenario. De hecho, el empleo de la técnica de transmisión OPRAM consigue que únicamente el 9% de los paquetes transmitidos empleen una potencia superior al umbral mínimo establecido de 0.25W.

Dado que el modo de operación de OPRAM logra una considerable reducción del nivel de potencia de transmisión promedio comparado con una política de transmisión de potencia fija de 2W, los vehículos presentan en promedio un menor rango de cobertura y, consecuentemente, un menor número de vehículos reciben (con o sin error) cada paquete transmitido. En este punto, es de destacar que en sistemas de comunicaciones móviles vehiculares donde un elevado número de vehículos podrá encontrarse transmitiendo sobre el mismo canal radio, lo importante no es recibir una gran cantidad de paquetes sino recibir únicamente aquellos paquetes que sean relevantes para cada vehículo y minimizar la interferencia que cada vehículo pueda causar. Dicha interferencia puede reducirse evitando que los vehículos transmitan paquetes a vehículos situados a grandes distancias, puesto que no se verán influenciados por la información que transporten.

5.3.1. Modelo de movilidad uniforme

La Figura 11 muestra el promedio del número de paquetes detectados por segundo y por kilómetro en el escenario bajo evaluación. Como puede observarse, el incremento de la potencia de transmisión de OPRAM en RA aumenta en solo un 8% el número de paquetes detectados en el escenario con respecto a una potencia de transmisión fija de 0.25W. Sin embargo, el empleo de una potencia constante de 2W produce un incremento cercano al 80%. Es de destacar que esta gran diferencia se produce sin ninguna mejora en cuanto al rendimiento de seguridad vial de la aplicación, por lo que puede concluirse que OPRAM realiza un uso más eficiente del canal radio al evitar la recepción innecesaria de paquetes que no proporcionan información relevante a la aplicación en uso (en este caso, una aplicación de seguridad vial para evitar accidentes en intersecciones). Como consecuencia, OPRAM reduce la ocupación del canal radio y la congestión, y mejora la escalabilidad del sistema.

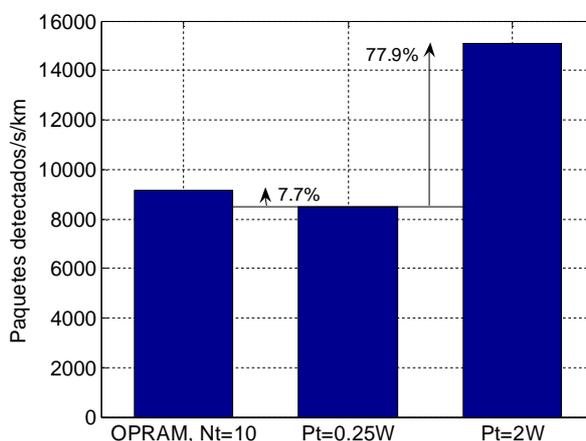


Figura 11. Número medio de paquetes detectados por segundo y por kilómetro.

La ineficiente gestión del canal radio observada mediante el empleo de potencias de transmisión fijas en comparación con el empleo de OPRAM se enfatiza cuando se analiza la cantidad de paquetes recibidos incorrectamente debido a colisiones (principalmente por el problema *hidden terminal*) o errores en el canal radio. La Figura 12 muestra la distribución de los paquetes que han sido detectados por los vehículos en el escenario bajo evaluación y que se clasifican en:

- RCV: paquetes correctamente recibidos.
- ERR: paquetes recibidos con error debido únicamente a la propagación radio.
- COL: paquetes recibidos con error debido únicamente a la colisión de paquetes.
- ECO: paquetes recibidos con error debido a la propagación radio y a la colisión de paquetes.
- TRX: paquetes recibidos con error debido a que el vehículo se encontraba transmitiendo su propio paquete en el momento de la recepción.

Como era de esperar, los resultados presentados en la Figura 12a muestran que el incremento de la potencia de transmisión produce un aumento de la cantidad de paquetes recibidos correctamente, pero también un aumento del número de paquetes recibidos con error debido a errores en la transmisión radio o colisiones. De los resultados de la Figura 11 y la Figura 12a se desprende que, mientras OPRAM solo incrementa ligeramente la cantidad de paquetes detectados (la suma de RCV, ERR, COL, ECO y TRX) en comparación con la política de transmisión de potencia constante mínima, OPRAM obtiene una considerable mejora de QoS en seguridad vial. Sin embargo, un incremento mayor de la cantidad de paquetes detectados (por ejemplo con mayores potencias de transmisión) no produce una mejora adicional del nivel de QoS. Por el contrario, un innecesario y constante incremento de la potencia de transmisión aumenta la ocupación del canal con información no relevante para los vehículos que la reciben, incrementando así la congestión del canal y reduciendo la escalabilidad del sistema.

Los beneficios de la técnica de transmisión OPRAM en términos de eficiencia se resaltan más aún en la Figura 12b, donde se ilustra la distribución de los paquetes detectados en términos relativos. Dicha figura claramente muestra que el empleo de una potencia de transmisión constante elevada incrementa la probabilidad de colisión de paquetes y, consecuentemente, la congestión del canal. Por otro lado, OPRAM, que únicamente incrementa los niveles de potencia de transmisión cuando es necesario para el cumplimiento de los niveles de QoS objetivo, presenta una probabilidad de colisión de paquetes similar a

la que se obtiene con el umbral mínimo de potencia de transmisión. Estos resultados indican claramente que la adaptación de los parámetros de transmisión de manera oportunista mejora la eficiencia del sistema al tiempo que es capaz de garantizar los niveles de QoS exigidos, además de reducir el consumo energético y la exposición a campos electromagnéticos.

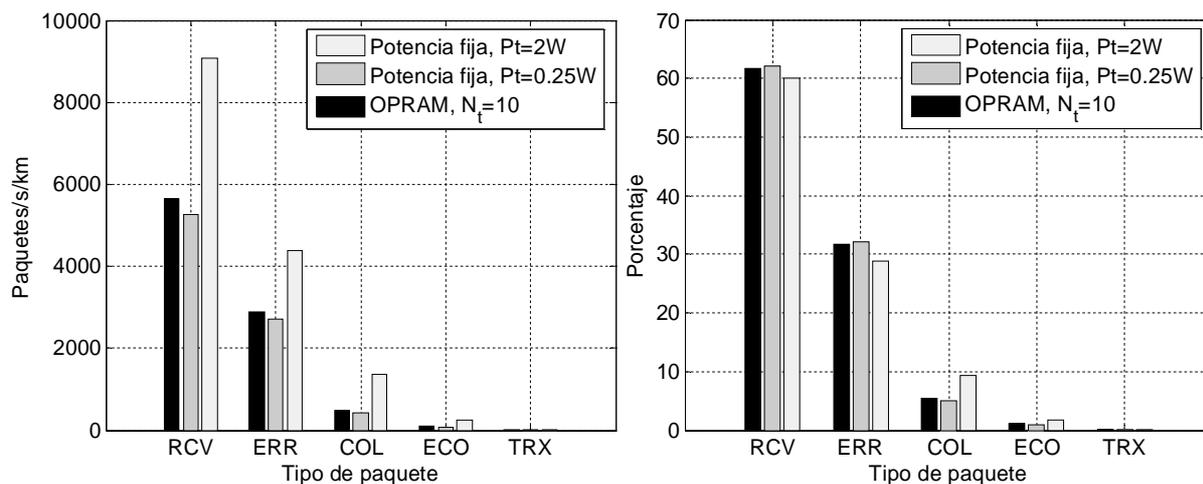


Figura 12. Distribución de paquetes detectados a nivel de sistema. (a) Número absoluto de paquetes por segundo y por kilómetro. (b) Porcentaje de paquetes respecto al total de paquetes detectados.

5.3.2. Modelo de movilidad realista

Para analizar si las conclusiones extraídas anteriormente pueden estar influenciadas por el modelo de movilidad empleado para los vehículos, a continuación se revisa el estudio anterior empleando trazas de movilidad realistas extraídas del simulador de tráfico SUMO. Como ya se ha mencionado, el empleo de un modelo de movilidad uniforme produce una distancia crítica idéntica y unos niveles de potencia de transmisión en RA iguales para todos los vehículos. En cambio, los simuladores de tráfico realistas son capaces de reflejar en el movimiento de los vehículos su dependencia con el tráfico cercano, variando así su velocidad y, consecuentemente, su distancia crítica y la distancia de aplicación de OPRAM. En particular, la reducción de la velocidad vehicular, derivada de situaciones temporales de congestión de tráfico, produce una disminución del valor de DC y de los niveles de potencia de transmisión de OPRAM. Mientras con el modelo de movilidad uniforme cerca del 9% de los paquetes que son transmitidos empleando una potencia superior al umbral mínimo establecido de 0.25W, con el modelo de tráfico realista dicho porcentaje es del 2%. A pesar de esta reducción del nivel de potencia, OPRAM sigue garantizando en entornos realistas que el 99% de los vehículos que se aproximan a una intersección con riesgo de colisión

reciban al menos un mensaje de seguridad *broadcast* procedente del vehículo con el que presentan riesgo de colisión antes de alcanzar la distancia crítica DC.

Como muestra la Figura 13a para condiciones realistas de tráfico, OPRAM únicamente necesita incrementar levemente la carga en el canal radio para satisfacer los niveles de QoS requeridos por la aplicación, comparado con el esquema de potencia de transmisión mínima. Un mayor incremento de la potencia de transmisión únicamente produce una mayor ocupación del canal radio y mayor probabilidad de pérdida de paquetes por colisión radio (ver Figura 13b) debido a la recepción de información no relevante procedente de vehículos situados a grandes distancias, que únicamente contribuye en la sobrecarga del canal de comunicaciones. En definitiva, OPRAM satisface los requisitos de QoS requeridos empleando los recursos radio de forma más eficiente.

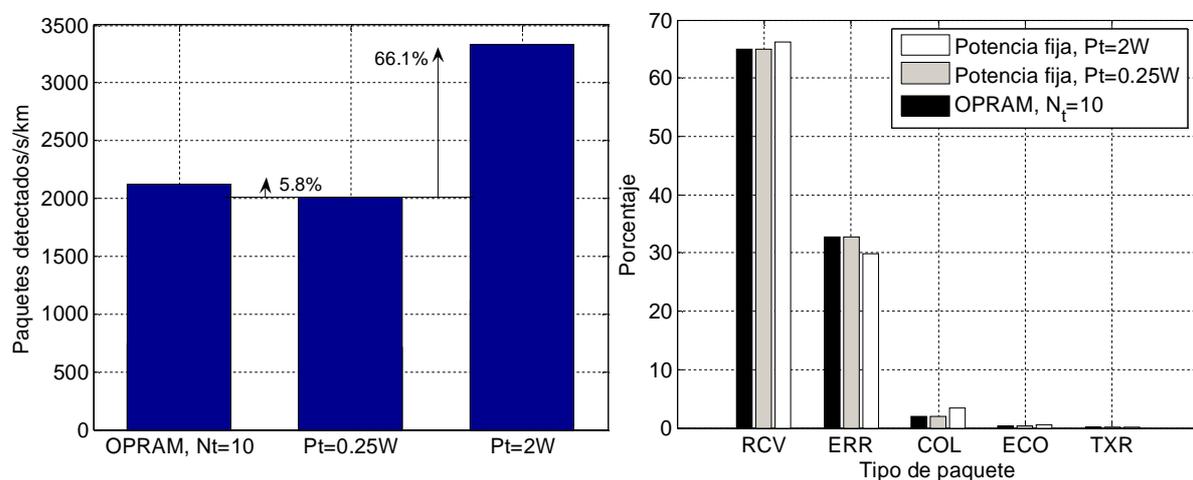


Figura 13. (a) Número medio de paquetes detectados por segundo y por kilómetro. (b) Distribución de paquetes detectados a nivel de sistema. Porcentaje de paquetes respecto al total de paquetes detectados.

6. CONCLUSIONES

Los futuros sistemas de comunicaciones móviles entre vehículos se presentan como una prometedora tecnología ITS para la mejora de la seguridad vial y la movilidad gracias al intercambio continuo de información entre los propios vehículos y entre los vehículos y elementos de infraestructura. Las características propias del entorno vehicular requieren el diseño de nuevos protocolos de comunicación para soportar las distintas aplicaciones y servicios de forma fiable, eficiente y escalable. En este trabajo se ha analizado el rendimiento y la eficiencia de distintos protocolos de comunicaciones móviles entre vehículos en entornos realistas. Por un lado, se ha evaluado el rendimiento de varios protocolos de encaminamiento multihop para identificar sus deficiencias y, en base a los resultados obtenidos, se han diseñado diversos mecanismos que optimizan su rendimiento

de forma eficiente. Por otro lado, el potencial de protocolos de transmisión adaptativa para garantizar la fiabilidad y escalabilidad de las comunicaciones entre vehículos ha quedado también demostrado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Fomento de España a través del proyecto T39/2006 y por la Consellería de Empresa, Universidad y Ciencia de la Generalitat Valenciana (beca BFPI06/126).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] "IEEE P802.11p/D4.0: Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. Amendment 8: Wireless Access in Vehicular Environments", *IEEE Standards Association*, Marzo 2008.
- [2] "IEEE 1609: Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)", *IEEE Standards Association*, 2006.
- [3] "The CALM Handbook: Continuous Air-interface Long and Medium range", ISO TC204, Septiembre 2004.
- [4] WINNER Wireless World Initiative New Radio, "D1.1.1. WINNER II interim channel models", Documento Publico, Noviembre 2006.
- [5] M. Gudmundson, "Correlation model for shadow fading in mobile radio systems", *Electronic Letters*, Noviembre 1991, pp. 2145-2146.
- [6] H. Füßler, M. Mauve, H. Hartenstein, M. Käsemann y D. Vollmer, "Location-Based Routing for Vehicular Ad-Hoc Networks", *Proc. of the 8th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking Mobi-Com*, Atlanta (USA), Septiembre 2002, pp. 47-49.
- [7] B. Karp y H. Kung, "Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks", *Proc. of the 6th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking Mobi-Com*, Boston (USA), Agosto 2000, pp. 243-254.
- [8] J. Tian, L. Han, K. Rothermel y C. Cseh, "Spatially aware packet routing for mobile ad hoc inter-vehicle radio networks", *Proc. of the IEEE International conference on Intelligent Transportation Systems*, Shangai (China), Octubre 2003, pp.1546-1551.
- [9] H. Füßler, J. Widmer, M. Käsemann, M. Mauve y H. Hartenstein, "Contention-Based Forwarding for Mobile Ad-Hoc Networks", *Elsevier's Ad-Hoc Networks*, 1 (4), Noviembre 2003, pp. 351-369.
- [10] M. Sepulcre y J. Gozalvez, "Dimensioning WAVE-based inter-vehicle communication systems for vehicular safety applications", *Proc. of the 3rd International Symposium on*

- Wireless Communications Systems ISWCS*, Valencia (España), Septiembre 2006, pp. 312-316.
- [11] J. Gozalvez y M. Sepulcre, "Opportunistic technique for efficient wireless vehicular communications", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Diciembre 2007, pp. 33-39.
- [12] Vehicle Safety Communications Consortium, "Vehicle safety communications project task 3 - Final Report: Identify intelligent vehicle safety applications enabled by DSRC", *DOT HS 809 859*, Marzo 2005.
- [13] M. Sepulcre y J. Gozalvez, "Wireless Vehicular Adaptive Radio Resource Management Policies in Congested Channels", *Proc. of the 4th IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems ISWCS*, Trondheim (Noruega), Octubre 2007, pp. 380-384.