

## Simulación de Algoritmos para regular el Flujo Vehicular y la Comunicación entre Vehículos Móviles Autónomos utilizando Redes Ad Hoc

Raúl Aquino Santos<sup>1</sup>, Apolinar González Potes<sup>2</sup>, Luis A. Villaseñor Gonzalez<sup>3</sup>, Alfons Crespo<sup>4</sup>, Jaime Sanchez<sup>3</sup>, José R. Gallardo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Telemática, Universidad de Colima, Av. Universidad 333, C. P. 28040, Colima, Colima, México (e-mail: aquinor@ucol.mx)

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad de Colima, Carretera Coquimatlán-Colima, Km. 1, México (e-mail: apogon@ucol.mx)

<sup>3</sup>Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Carretera Tijuana-Ensenada, Km. 107, México (e-mail: luisvi@cicese.mx)

<sup>4</sup>Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera, nº14, 46022, Valencia, España, (e-mail: acrespo@disca.upv.es)

**Resumen:** Se presenta en este trabajo el análisis, desarrollo, simulación y resultados de dos algoritmos que tienen la finalidad de regular el flujo vehicular y la comunicación entre vehículos móviles autónomos. El flujo vehicular es simulado con un algoritmo microscópico y la comunicación entre vehículos móviles autónomos es simulada con un algoritmo basado en localización geográfica ambos implementados en el mismo escenario de simulación. La hipótesis que se pretende demostrar en este trabajo de investigación es que para lograr una comunicación eficiente entre vehículos móviles autónomos son necesarios dos componentes: un flujo vehicular constante y un protocolo de comunicación que incorpore un algoritmo de predicción. Copyright © 2009 CEA.

**Palabras Clave:** redes ad hoc vehiculares, modelo microscópico, vehículos autónomos, tecnología inalámbrica, simulación de redes.

### 1. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de evitar los altos costos de comunicación y garantizar los retardos mínimos requeridos para intercambiar datos eficientemente entre vehículos móviles autónomos, se considera que los sistemas de comunicación basados en redes ad-hoc representan una opción ideal. La tecnología inalámbrica ad-hoc permitirá a los vehículos móviles autónomos comunicarse entre ellos sin ninguna infraestructura de comunicaciones fija. El principal reto para regular el flujo vehicular consiste en la implementación de un mecanismo de comunicación eficaz entre los vehículos.

El movimiento de los vehículos autónomos deberá ser regulado eficientemente por medio de estos sistemas de comunicación inalámbrica ad hoc, con el fin de lograr un flujo vehicular constante (Santos R. A. et al., 2002). Para lograr una automatización total se deben desarrollar distintos sistemas de control inteligente que actúen de forma coordinada: control manual, control de crucero autónomo inteligente, dispositivo de límite de velocidad estática, dispositivo de límite de velocidad inteligente, control de distancia centralizada, dispositivo de límite de velocidad inteligente junto con un control de movimiento centralizado y de dirección de carril, y finalmente dispositivo de límite de velocidad inteligente junto con un control de movimiento centralizado y un control lateral inteligente y dirección de carril.

Existen algunos proyectos para desarrollar esta tecnología en casos experimentales, por ejemplo Fleenet, CarTALK 2000,

El sistema más sofisticado considerado puede ser descrito como un sistema de conducción automática sobre una autopista multi-carril. Otro ejemplo de automatización total que puede encontrarse en la literatura es en los robots móviles cooperativos (Ramy, Yared. et al., 2007). El impacto de la tecnología inalámbrica y los algoritmos de comunicación han sido tan importantes que la industria automotriz los ha incluido en sus desarrollos, los cuales pueden observarse en los automóviles actuales que se encuentran equipados con tecnologías de comunicación y posicionamiento global. En un futuro cercano, los sistemas de producción de vehículos incluirán tecnología de redes inalámbricas ad-hoc para regular el flujo vehicular.

Los algoritmos de comunicación entre vehículos móviles autónomos deberán de considerar un alto dinamismo y densidad de los nodos, por lo que deberán realizarse experimentos a pequeña escala y posteriormente validarse con simulaciones en redes a gran escala. En redes de pequeña escala un algoritmo debe permitir la transferencia de información de un vehículo móvil autónomo a otro, como lo hace una red durante el envío de datos extremo a extremo. Este mecanismo de transferencia de información punto a punto es la clave para las redes ad-hoc, de esta manera, cuando se desea enviar información de un punto a otro donde no es posible de manera directa, es cuando se realiza la función de relevo, que permite enviar la información de la fuente al destino a través de múltiples saltos.

CarNET, Car2Car Cooperation Consortium y Cartel. Sin embargo, ninguno de ellos ha podido demostrar aplicaciones

experimentales con más de 10 vehículos móviles autónomos. El resto del presente trabajo de investigación se estructura de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta una descripción de los algoritmos de comunicación para vehículos móviles autónomos. En la sección 3, se analiza el algoritmo de enrutamiento de localización con difusión basada en grupos. Se describe, en la Sección 4, la simulación del algoritmo para regular el flujo vehicular. Se muestra en la sección 5, los resultados obtenidos con la simulación y en la sección 6, se presentan las conclusiones y trabajo a futuro.

## 2. ALGORITMOS DE COMUNICACIÓN PARA VEHÍCULOS MÓVILES AUTÓNOMOS

El objetivo de los algoritmos de comunicación para vehículos móviles autónomos es permitir una comunicación eficiente, de tal forma que éstos puedan compartir información relacionada con su posición, velocidad, destino, y otros parámetros importantes para incrementar o reducir su velocidad, y así evitar colisiones, optimizar flujos, etc.

Los algoritmos de comunicación para vehículos móviles autónomos se pueden clasificar en dos categorías: posicionales y no-posicionales. Los algoritmos no-posicionales a su vez se clasifican en proactivos, reactivos e híbridos. Los algoritmos proactivos o manejados por tablas, periódicamente actualizan la información topológica de sus nodos, haciendo que la información esté disponible en el momento que se requiera. La desventaja de estos algoritmos, es que demandan un mayor ancho de banda para transmitir periódicamente la información topológica. Esto podría resultar en una congestión de la red, ya que cada nodo es responsable de propagar la actualización topológica en respuesta a cualquier cambio de conectividad de la misma (Perkins, 2000); dos de los algoritmos más populares en esta categoría son enrutamiento de estado de enlace optimizado (Optimized Link State Routing, OLSR) (Clausen, Thomas. et al., 2006) y diseminación topológica basada en transmisión de trayectoria inversa (Topology Dissemination Based on Reverse Path Forwarding, TBRPF) (Ogier, Richard. et al., 2004). Estos dos algoritmos registran las rutas para todos los posibles destinos en la red, resultando en un retardo inicial mínimo (latencia). A este tipo de algoritmos se les llama proactivos por que almacenan la información de todas las posibles rutas antes de que sean requeridas y también se les conoce como manejados por tablas debido a que la información está disponible en tablas.

Por su parte, los algoritmos reactivos o sobre-demanda, adquieren la información de las rutas solo cuando se les solicita. Los algoritmos de enrutamiento reactivos frecuentemente utilizan un menor ancho de banda para mantener las tablas de rutas. Sin embargo, la desventaja es que el tiempo de descubrimiento de rutas para muchas aplicaciones podría incrementarse. Muchas aplicaciones podrían sufrir retardos al inicio, porque la ruta hacia el destino debe ser adquirida antes de que se inicie la comunicación. Los algoritmos sobre-demanda deben de realizar un proceso de descubrimiento de ruta antes de que el primer paquete de datos pueda ser enviado, resultando en un mínimo tráfico de control, pero al costo de incrementar la latencia durante el descubrimiento de una ruta al destino (Zou, Xukai. et al., 2002). Como ejemplos de algoritmos reactivos o sobre-demanda podemos mencionar enrutamiento de vector de distancia ad-hoc (Ad-Hoc On-Demand Distance Vector Routing, AODV) (Perkins, Charles. et al., 2003) y el algoritmo

de enrutamiento de fuente dinámico (Dynamic Source Routing, DSR) (Jonson, David. et al., 2007).

Un protocolo que combina ambos algoritmos proactivos y reactivos se le conoce como protocolo híbrido. (Schaumann, Jan., 2002). El algoritmo más popular en esta categoría es el Protocolo de Enrutamiento por Zonas (Zone Routing Protocol, ZRP). En ZRP, la red se divide en zonas de enrutamiento que se traslanan, las cuales pueden usar protocolos independientes dentro y entre cada zona. ZRP se considera como un protocolo híbrido debido a que combina algoritmos proactivos y reactivos para mantener las tablas de rutas válidas sin causar un excesivo sobre-procesamiento. La comunicación dentro de una zona específica se realiza a través del protocolo de enrutamiento IARP (Intrazone Routing Protocol), el cual proporciona descubrimiento de vecinos directamente de forma efectiva (enrutamiento proactivo). La comunicación entre diferentes zonas, es realizada por el protocolo de enrutamiento IERP (Inter-zone Routing Protocol), el cual proporciona capacidad de enrutamiento entre nodos que deben de comunicarse entre zonas (enrutamiento reactivo).

La principal desventaja de los algoritmos de enrutamiento puramente proactivos o reactivos en ambientes con alta movilidad consiste en que no son escalables. Una segunda desventaja es su muy baja capacidad de comunicación, la cual es el resultado de un número muy alto de retransmisiones (Mauve, Martin. et al., 2001). Para superar estas limitaciones, se han desarrollado nuevos tipos de algoritmos de enrutamiento que emplean información de posicionamiento geográfico: enrutamiento ayudado con localización (Location-Aided Routing, LAR) (Bae-Young and Nitin, 1998), algoritmo con efecto de enrutamiento de distancia móvil (Distance Routing Effect Algorithm for Mobility, DREAM) (Basagni, Stefano. et al., 1998), servicio de localización basado en rejillas (Grid Location Service, GLS) (Li, Jinyang. et al., 2000), y enrutamiento sin estado con perímetro codicioso (Greedy Perimeter Stateless Routing, GPSR) (Karp and Kung, 2000).

El protocolo LAR se considera como un tipo de enrutamiento basado en inundación direccional (Giordano, Silvia. et al., 2003) por que no está desarrollado como un protocolo de enrutamiento basado en localización geográfica. Sin embargo, se puede hacer uso de un servicio de localización para mejorar su desempeño, particularmente en el caso de descubrimiento de posición nodal. Una desventaja significativa de LAR es que se considera que el nodo fuente conoce de antemano la información de localización y velocidad promedio del nodo destino. Si el nodo fuente no tiene información acerca de la localización del nodo destino, el algoritmo transmite el mensaje en cada dirección, posiblemente inundando la red, intentando encontrar al nodo destino.

DREAM es proactivo en naturaleza, por lo que podría no ser apropiado para redes grandes debido a aspectos relacionados con la escalabilidad (Mauve, Martin. et al., 2001). Una desventaja muy específica es que la tabla de enrutamiento de cada nodo en la red debe mantener la posición de los demás nodos, resultando en un volumen grande de paquetes de localización.

El algoritmo GLS hace uso de la estrategia denominada todos para algunos debido a que todos sus nodos deben de almacenar la información en algunos nodos específicos de la red. Aunque GLS es jerárquico, también es de tipo proactivo y por lo tanto no

es considerado muy eficiente en ambientes muy dinámicos (Mauve, Martín. et al., 2001). La principal desventaja de GLS es que en ambientes dinámicos, con significantes cambios topológicos, se incrementa la transmisión de paquetes de control y subsecuentemente se comprometen los recursos de ancho de banda.

El algoritmo GPSR parece ser el más adecuado de los algoritmos de enrutamiento basados en localización, para ser comparado con nuestra propuesta de algoritmo de enrutamiento de localización con difusión basada en grupos (Location Routing Algorithm with Cluster-Based Flooding, LORA-CBF) para comunicación inter-vehicular. Además, GPSR y LORA-CBF emplean el mismo mecanismo de transmisión (greedy forwarding), el cual transmite los paquetes al nodo vecino que se encuentra más cerca del destino.

Este trabajo presenta la simulación de dos algoritmos en un mismo escenario: un algoritmo de comunicación entre vehículos móviles autónomos para redes de gran escala (250 nodos), y un algoritmo de control de flujo que permite una movilidad constante basado en un modelo de tráfico microscópico. Se propone que la movilidad sea constante, esto derivado de un trabajo previo (Santos R. A. et al., 2002), en el cual se comparó el flujo vehicular constante y aleatorio y los resultados favorecen al flujo vehicular constante. El reto a resolver en este tipo de escenarios es el bajo porcentaje de paquetes recibidos, debido a la alta variabilidad en la velocidad de los vehículos, que ocasiona separaciones entre los mismos, estas separaciones son frecuentemente mayores que la mínima distancia permitida para realizar la comunicación entre los vehículos.

### 3. ALGORITMO DE ENRUTAMIENTO DE LOCALIZACIÓN CON DIFUSIÓN BASADA EN GRUPOS

Nuestra propuesta es un algoritmo de enrutamiento de localización con difusión basada en grupos (LORA-CBF), el cual se utilizará sobre el algoritmo de control de flujo vehicular (Santos R. A. et al., 2005). La ventaja de usar información de localización en vehículos móviles autónomos es que el enrutamiento puede ser ligero y eficiente. Además, no se consideran paquetes de errores en este tipo de algoritmos. Esto es posible debido a que el vehículo en cuestión solo necesita conocer información de los vehículos vecinos y del vehículo destino.

Para comprender mejor lo mencionado anteriormente, expliquemos lo que sucede con los algoritmos no-basados en posición geográfica. En el caso de falla en los enlaces o cambios topológicos en la red, existe la posibilidad de desconexión de ruta, lo que generará la transmisión de paquetes de errores, estos paquetes de errores se generarán en mayor frecuencia si la desconexión se hace más frecuente, como en el caso de redes ad hoc vehiculares, lo que ocasionaría una congestión en la red. Sin embargo, con algoritmos de enrutamiento basados en localización geográfica, el algoritmo de enrutamiento no requiere del uso de paquetes de errores para notificar los cambios de topología en la red. Un vehículo fuente que utiliza enrutamiento geográfico, incluye la localización del vehículo destino en cada uno de los paquetes, de tal forma que los vehículos vecinos antes de retransmitir el paquete necesitan saber si su ubicación es más cerca del destino que el vehículo

fuente. Por lo tanto, la probabilidad de mantener un enlace entre dos vehículos en la misma área es mucho mayor que intentar mantener actualizada la información de topología de un enlace entre fuente y destino a través de múltiples saltos entre vehículos. En los algoritmos de enrutamiento basados en localización geográfica, los paquetes son enviados en la red a través de vehículos intermedios y en cada uno de éstos se debe tomar una decisión puramente local para enviar el paquete hacia el vehículo vecino que está geográficamente más cerca del destino. Dado que el paquete enviado no involucra ninguna información global, la cantidad de información que se envía a un destino específico se reduce significativamente, lo cual también reduce la posibilidad de disolución de los enlaces de comunicación en vehículos intermedios. Esta ventaja en particular permite al enrutamiento geográfico escalar y funcionar bien en ambientes de red, que utilizan vehículos con alta movilidad.

LORA-CBF hereda las propiedades de los algoritmos reactivos y jerárquicos y presenta grandes ventajas con respecto a otros algoritmos de enrutamiento topológicos al utilizar información de localización geográfica. Además, LORA-CBF minimiza la inundación de paquetes de control a través de su mecanismo de difusión que utiliza nodos específicos llamados “gateways”. Para evitar la sincronización en las transmisiones (Jacquet, Philippe. et al., 2002) (Floyd and Jacobson, 1994), el reenvío de paquetes es retardado aleatoriamente.

Varios investigadores han implementado estrategias de difusión basadas en grupos para algoritmos de enrutamiento en redes ad-hoc inalámbricas (Mitelman and Zaslavsky, 1999), (Krishna, P. et al., 1997), (Das, Bevas. et al., 1997), (Sivakumar, Raghupathy. et al., 1998), (Chiang, Ching-Chuang. et al., 1998). La principal contribución de este trabajo es el mecanismo de formación de grupos y la disminución en la retransmisión de los paquetes de control.

La formación de grupos en (Mitelman and Zaslavsky, 1999), esta basado en el algoritmo de grupo entrelazado (Link Cluster Algorithm, LCA (Baker, Dennis. 1984)), el cual a su vez esta implementado con el protocolo de enrutamiento de estado de enlace (Link State Routing protocol, LSR), donde todos los nodos en el grupo deben de responder a la actualización de estado del enlace; si uno de los nodos no envía su reconocimiento, el nodo líder del grupo retransmite la actualización a ese nodo en particular. En (Krishna, P. et al., 1997) y (Das, Bevas. et al., 1997), la retransmisión de los paquetes se realiza exclusivamente por los nodos ubicados en los límites de la red, los demás nodos simplemente escuchan y actualizan sus tablas de enrutamiento. En (Sivakumar, Raghupathy. et al., 1998), existen dos tipos de estrategias de enrutamiento: enrutamiento óptimo de espina dorsal (Optimal Spine Routing, OSR), y enrutamiento con reconocimiento parcial de espina dorsal (Partial-knowledge Spine Routing, PSR). OSR, utiliza un conocimiento completo y actualizado de la topología de la red, tal que el nodo fuente puede determinar la ruta al nodo destino, por su parte PSR, utiliza un conocimiento parcial de la topología de la red y toma una aproximación codiciosa “greedy” para determinar la trayectoria más corta hacia el nodo destino. En (Chiang, Ching-Chuang. et al., 1998), los autores utilizan un protocolo de líder de grupo controlado por una estafeta para reservar el canal entre los nodos.

En el algoritmo LORA-CBF, se ha implementado una estrategia

de retransmisión, donde solo los “gateways” que pertenecen a diferentes líderes de grupos retransmiten los paquetes de control, mejorando el procesamiento de enrutamiento en la red. Aparte de los paquetes “Hello”, LORA-CBF no genera tráfico de control adicional en respuesta a fallas en los enlaces u otros problemas de la red, lo que lo hace apropiado para redes densas y con alta movilidad. LORA-CBF está diseñado para trabajar en una manera distribuida completamente y no depende de ninguna entidad central, además no requiere de una transmisión confiable de sus paquetes de control, ya que tiene integrado un algoritmo de predicción que considera la pérdida de paquetes.

LORA-CBF implementa diversas funciones requeridas para realizar las tareas de enrutamiento. En esta sección describimos las generalidades de cada una de ellas.

#### Descripción de los nodos

Un nodo en nuestra propuesta se caracteriza por integrar una interfaz inalámbrica 802.11b/g, el algoritmo de comunicación entre vehículos móviles autónomos y el algoritmo de control de flujo vehicular. Las funciones básicas de los nodos se organizan en cuatro estados:

- 1 Sin decisión. Es un nodo que se encuentra en un estado transitorio, por lo general es un nodo que inicia su transmisión y se encuentra buscando un líder de grupo.
- 2 Miembro. Es un nodo que pertenece a un grupo y tiene asignado un líder de grupo. En LORA-CBF, un miembro no retransmite un paquete de control.
- 3 Gateway. Es un nodo que es miembro de al menos dos grupos y es utilizado para comunicación entre grupos.
- 4 Líder de grupo. Es un nodo que es responsable de todos los nodos en un grupo y envía periódicamente paquetes “Hello”.

Así mismo cada nodo realiza una función de descubrimiento de vecinos, en la cual detecta los nodos vecinos con los cuales tiene un enlace directo. Para lograr esto, cada nodo transmite periódicamente paquetes “Hello”, que contienen la información de localización, y del estado del nodo. Los paquetes “Hello” son transmitidos en modo omni-direccional (broadcast), y son recibidos exclusivamente por cada uno de los vecinos en su área de cobertura.

#### Comunicación entre vehículos

La transmisión de los paquetes de datos, está basada en la localización de los vehículos fuente, destino y vehículos vecinos. Debido a que el protocolo LORA-CBF no es topológico, los paquetes de datos pueden seguir rutas diferentes cada vez que éstos se envían entre el vehículo fuente y el vehículo destino. Para lograr la comunicación entre vehículos en redes con alta movilidad, es necesario mantener la información de localización actualizada. Para tal efecto, LORA-CBF mantiene y actualiza la información de localización de los vehículos fuente y destino cada vez que ellos envían y reciben paquetes de datos y de reconocimiento. La fuente actualiza su información de localización y la coloca dentro del paquete de datos antes de enviarlo y el destino hace lo mismo en el paquete de reconocimiento.

LORA-CBF utiliza una estrategia de retransmisión conocida

como más adelante dentro del radio (Most Forward within Radius, MFR). En MFR el paquete es enviado al vehículo vecino que reduce la distancia más eficientemente hacia el vehículo destino. La ventaja de este método es que reduce considerablemente la posibilidad de colisiones y el retardo punto a punto entre los vehículos fuente y destino (Giordano, Silvia. 2003). En ambientes con alta movilidad, el conocer la posición de los vehículos vecinos es fundamental en la eficiencia de enrutamiento de cualquier algoritmo. LORA-CBF con la ayuda de su algoritmo de predicción puede estimar la posición de un vehículo basado en las posiciones anteriores (Vilalta, R. et al., 2002). Después de estimar la posición de todos sus vehículos vecinos, LORA-CBF envía el paquete al vehículo vecino que se encuentra en la posición más óptima (MFR).

La movilidad y las colisiones en el medio inalámbrico pueden ocasionar la pérdida de los paquetes, lo que constituye un aspecto muy importante en el diseño de los algoritmos de predicción. El algoritmo de predicción empleado en LORA-CBF considera esta situación e incluye la separación o pérdida de los paquetes recibidos, además el algoritmo de predicción trata de interpolar estadísticamente la posición de los vehículos vecinos un periodo de tiempo adelante.

$$p_n(t+k) = p_n(t) + \Delta p_n(t) * e_n(t)$$

donde.

$P_n(t+k)$	posición futura del vehículo vecino n
$P_n(t)$	posición actual del vehículo vecino n
$\Delta P_n(t)$	intervalo entre la posición actual y anterior del vehículo vecino n
$e_n(t)$	factor indicando la separación entre paquetes recibidos

#### 4. SIMULACIÓN DE UN ALGORITMO PARA REGULAR EL FLUJO VEHÍCULAR

Con el objetivo de lograr un flujo vehicular constante, se propone un algoritmo para regular de flujo vehicular basado en un modelo de tráfico microscópico, que considera un aspecto fundamental como es el control de la velocidad de acuerdo a la separación entre vehículos. En este trabajo se representa la movilidad de 250 vehículos que incorporan el modelo de control de flujo vehicular propuesto. Además se incorpora un algoritmo de comunicación para vehículos cooperativos autónomos LORA-CBF, el cual se comparará con otro algoritmo muy popular (GPSR). La comparación entre los dos algoritmos de comunicación para vehículos móviles autónomos será de acuerdo a métricas estándares de evaluación predefinidas por la comunidad científica con el fin de visualizar el comportamiento y los beneficios aportados por los algoritmos propuestos sobre un algoritmo de control de flujo vehicular.

#### Modelos de tráfico microscópico

Los autores en (Hoogendoorn and Bovy, 2001) y (Carmine, Festa. et al., 2001), clasifican los modelos de tráfico vehicular

en cuatro categorías: sub-microscópicos, microscópicos, mesoscópicos y macroscópicos. Los modelos sub-microscópicos describen las características individuales de los vehículos en el flujo de tráfico y la operación de partes específicas (sub-unidades) del vehículo (ejemplo, cambio de velocidades, frenado, etc.). Los modelos microscópicos simulan el comportamiento y la interacción entre conductores. Los modelos mesoscópicos representan a sistemas de transporte y analizan grupos de conductores con un comportamiento homogéneo. Finalmente, los modelos macroscópicos describen el tráfico a un nivel alto de agregación como un flujo sin distinguir sus partes básicas (Cvetkovski and Gavrilovska, 1998). Los modelos macroscópicos son utilizados para estudiar el flujo de tráfico de vehículos, evaluando variables tales como densidad, flujo y velocidad promedio. En cambio, los modelos microscópicos son más utilizados para estudiar el flujo de tráfico en áreas pequeñas pero con mayor detalle. Los modelos microscópicos consisten en sub-modelos que describen conductas particulares de los conductores, algunos de los más populares incluyen: aceptación del espacio entre vehículos, adaptación de velocidad, cambio de carril, rebase, y modo de pelotón. El sub-modelo de aceptación del espacio entre vehículos, determina la distancia mínima aceptable entre vehículos. El sub-modelo de adaptación de velocidad, se refiere a la adaptación de la velocidad a las condiciones de la autopista. El sub-modelo de cambio de carril, describe el comportamiento del conductor cuando decide si cambia o no de carril. Finalmente, el sub-modelo de pelotón, describe la interacción con vehículos precedentes en el mismo carril. Un aspecto fundamental en los vehículos inteligentes es el movimiento de forma de pelotón, el cual es un paso intermedio para lograr la fase final, que se describe como un sistema de conducción automática sobre una autopista multi-carril. Por lo anterior es para este trabajo fundamental incorporar este último sub-modelo.

A continuación se describen seis de los modelos de tráfico microscópico más populares: MIMIC, INTEGRATION, AIMSUM, MITSIM, VISSIM, y SIMONE 2000 (Logghe, S. 2003), los cuales están basados en el sub-modelo de pelotón. VISSIM contiene el número mayor de parámetros de configuración y AIMSUM el menor. La principal desventaja de los modelos MIMIC, INTEGRATION y VISSIM se debe a sus parámetros de calibración, los cuales tienen que ser ajustados durante el periodo de simulación. El modelo AIMSUM tiene la desventaja de que no define claramente como estimar la tasa máxima de desaceleración del vehículo anterior y la dificultad con MITSIM es que basa su tasa de aceleración o desaceleración sobre muchos intervalos de velocidad. Por otro lado, SIMONE 2000 basa su comportamiento en el sub-modelo de aceptación del espacio entre dos vehículos y un controlador longitudinal. Además incorpora los efectos de velocidad relativa, positiva o negativa. Por lo tanto el modelo de simulación de tráfico SIMONE 2000 es el óptimo para las condiciones y expectativas del presente trabajo de investigación.

El algoritmo de control de flujo vehicular desarrollado esta basado en el modelo de tráfico SIMONE 2000, el cual incorpora dos aspectos fundamentales: un control longitudinal y una función de distancia deseada. El control longitudinal determina la aceleración (positiva o negativa) necesaria para obtener una distancia mínima deseada hacia el vehículo de enfrente. Primero se define la función mínima deseada:

$$s_i(t) = l_i + \eta_i(t) \cdot (z0_i + z1_i \cdot v_i(t) + z2_i \cdot v_i(t)^2)$$

donde:

$s(t)$	distancia de separación deseada en metros
$i$	índice del vehículo
$l$	longitud del vehículo i
$\eta$	factor de congestión
$z0$	parámetro de margen en metros
$z1$	parámetro de espaciamiento lineal en segundos
$z2$	parámetro de espaciamiento cuadrático en segundos cuadrados
$v(t)$	velocidad en el tiempo $t$ en $m/s$

El control longitudinal trata de minimizar el error de distancia y las diferencias de velocidad de los vehículos anterior y posterior.

$$a_i(t + \tau) = \alpha_i \cdot (x_{i-1}(t) - x_i(t) - s_i(t)) + \beta_i^\pm \cdot (v_{i-1}(t) - v_i(t))$$

donde:

$a(t + \tau)$	aceleración aplicada después de un tiempo de retardo ( $m/s^2$ )
$x(t)$	coordenada $x$ del vehículo en el tiempo $t$ ( $m$ )
$v(t)$	velocidad en el tiempo $t$ ( $m/s$ )
$i$	índice del vehículo
$i - 1$	índice del vehículo líder
$\alpha$	sensibilidad de error de distancia ( $1/s$ )
$\beta^+$	sensibilidad de diferencia de velocidad (para diferencia positiva) ( $1/s^2$ )
$\beta^-$	sensibilidad de diferencia de velocidad (para diferencia negativa) ( $1/s^2$ )

### Escenario de Simulación

Las tres técnicas experimentales más importantes incluyen la experimentación, el análisis y la simulación. Debido a que el objetivo de este trabajo es desarrollar un algoritmo que permita la comunicación en vehículos móviles autónomos, la experimentación aunque posible podría ser impráctica en redes con muchos nodos, además existe un inconveniente asociado al costo de la implementación y los equipos de medición. El análisis aunque útil, no ha sido probado que sea muy conveniente en sistemas complejos (Schmidt, J. W., 1981). En cambio los modelos de simulación se han ido incrementando en su aplicación para sistemas complejos (Sargent, Robert. G., 1992). Este trabajo utiliza los resultados experimentales obtenidos en una red de pequeña escala (Santos, R. A., et al., 2005), los cuales fueron validados a través de simulaciones. Posteriormente, se validó LORA-CBF en una red de gran escala

comparándolo con dos algoritmos muy populares topológicos, AODV y DSR, considerando dos ambientes diferentes: urbano (dentro de una ciudad) y en una autopista. Nuestra intención es comparar LORA-CBF con uno de los algoritmos más populares geográficos que ha sido descrito en la literatura (Greedy Perimeter Stateless Routing, GPSR). Sin embargo, la falta de un algoritmo de predicción en GPSR, deterioró su funcionamiento al grado de no poder enviar datos de forma eficiente a más de dos saltos. Por lo que se decidió incorporar dentro de GPSR, un algoritmo de predicción igual que el de LORA-CBF. Las métricas más importantes que permiten describir el comportamiento de los algoritmos de comunicación para vehículos móviles autónomos son las siguientes:

**Tasa de entrega de paquetes.** Es la relación del número de paquetes de datos entregados al destino, al número de paquetes de datos enviados por la fuente.

**Retardo punto a punto.** Son todos los posibles retardos por encolamiento, retardos de retransmisión, y el tiempo de transferencia y propagación.

**Sobre-procesamiento de enrutamiento.** Es el número total de paquetes de enrutamiento transmitidos durante la simulación.

**Tiempo de descubrimiento de ruta (latencia).** Es el tiempo que el vehículo fuente tiene que esperar antes de enviar el primer paquete de datos.

**Sobre-procesamiento (paquetes).** Es el número total de paquetes de enrutamiento, divididos entre la suma del número total de paquetes de datos transmitidos y el número total de paquetes de enrutamiento.

**Carga de enrutamiento.** Es el número total de paquetes de enrutamiento transmitidos, entre el número total de paquetes de datos entregados al vehículo destino.

Los modelos para evaluar los protocolos de enrutamiento fueron desarrollados en OPNET. Debido a que el objetivo principal de la simulación es comparar el funcionamiento de los dos protocolos de enrutamiento, las fuentes de tráfico fueron consideradas con tasas de bits constantes (Constant Bit Rate, CBR). Los parámetros del modelo de comunicación fueron definidos en sus extremos de velocidad de transmisión 1 y 11 Mbps y un tamaño de paquete de 1448 bytes, similar al que se utilizó en el experimento (Santos, R. A., et al., 2005). Cada valor mostrado en las gráficas representa el promedio de 30 simulaciones y el error es menor al 10% en la mayoría de los valores reportados.

La función de coordinación distribuida (DCF) del estándar 802.11b es utilizada como el protocolo de control de acceso al medio. DCF incorpora los dos mecanismos de censado de portadora, físico y virtual para reducir la probabilidad de colisiones debido al problema del nodo escondido.

Las características físicas de cada interfaz, tal como potencia de transmisión, ganancia de antena y la sensibilidad del receptor, fueron configuradas iguales a la tecnología Enterasys 802.11b. Se Selecciónó un rango de transmisión de 300 m. el cual es

consistente con la tecnología 802.11b y antenas montadas en los vehículos con ganancia de 5 dBi.

La figura 1, representa el escenario simulado, durante la simulación los vehículos se mueven en sentidos opuestos con tres carriles por dirección. La separación de los vehículos al inicio de la simulación es de 75 mts. y un total de 250 vehículos fueron considerados. Al simular la dirección en sentidos opuestos aumenta la complejidad del sistema ya que la velocidad relativa de estos vehículos es de aproximadamente 300 km/h, que sin duda es difícil para cualquier algoritmo que requiera mantener una comunicación eficiente entre un vehículo fuente y un vehículo destino a través de varios saltos. Además un escenario de 250 vehículos es considerado un escenario de gran escala y por lo general en la literatura se consideran escenarios con un menor número de vehículos.

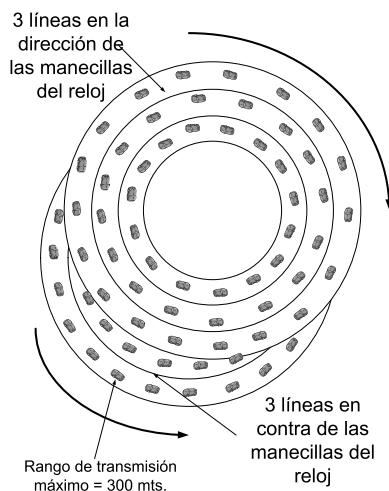
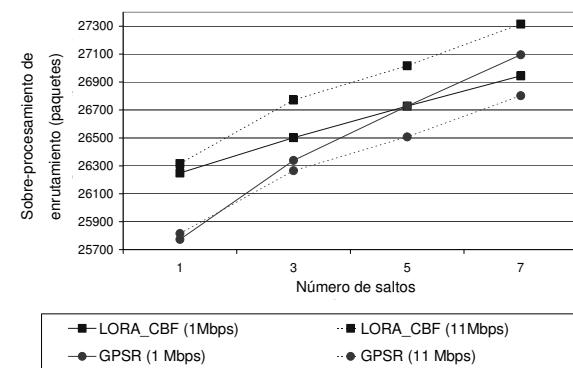
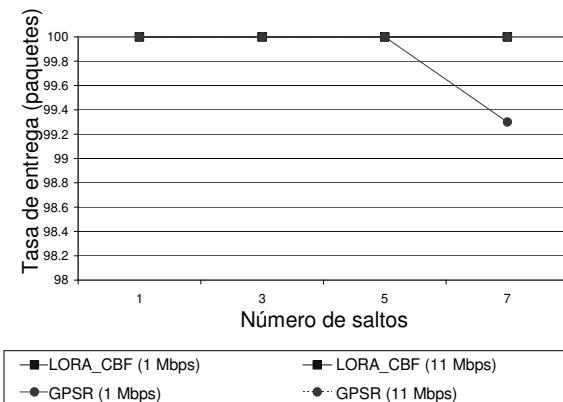


Figura 1. Escenario evaluado. Los vehículos están girando en direcciones opuestas durante el tiempo de simulación.

## 5. RESULTADOS OBTENIDOS POR LA SIMULACIÓN

La figura 2, representa la tasa de entrega de paquetes de GPSR y LORA-CBF. Se hace la observación que el algoritmo de predicción que se adaptó a GPSR mejoró el desempeño de éste en un 90% con respecto al algoritmo de GPSR básico. Ambos algoritmos tienen resultados similares con una velocidad de transmisión de 11 Mbps, pero GPSR tiene una tasa de entrega de paquetes mas baja a una velocidad de transmisión de 1 Mbps, esto debido a congestión causada por la retransmisión de paquetes en una arquitectura plana, al contrario de LORA-CBF que hace uso de una arquitectura jerárquica. Como ambos algoritmos utilizan el mismo mecanismo de retransmisión (MFR), su comportamiento es similar. LORA-CBF puede mantener una entrega de paquetes del 100% entre vehículos que se encuentran separados más de 2 Km. ó 7 saltos.



La figura 3, muestra los resultados del retardo extremo a extremo Ambos algoritmos tienen un funcionamiento idéntico, esto debido a su mecanismo de retransmisión.

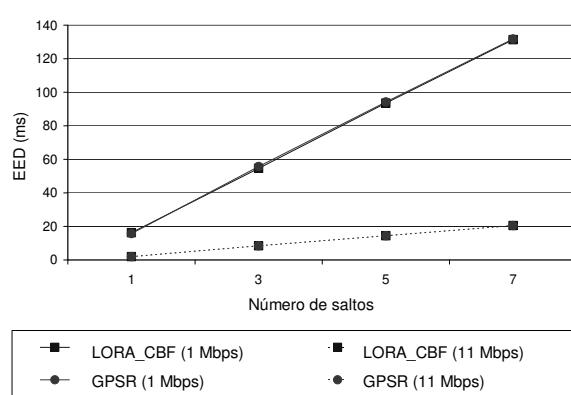


Figura 3. Retardo punto a punto.

La figura 4, presenta los resultados obtenidos del sobre-procesamiento de enrutamiento. LORA-CBF tiene mayor sobre-procesamiento de enrutamiento a una velocidad de transmisión de 11 Mbps, debido al mayor número de paquetes enviados. A velocidades de 1 Mbps, LORA-CBF tiene un mayor sobre-procesamiento de enrutamiento en nodos ubicados cerca de la fuente; por otro lado cuando la distancia entre la fuente y el destino empieza a incrementarse LORA-CBF mejora con respecto al desempeño de GPSR, esto es debido al algoritmo de difusión, que minimiza los paquetes de control.

La figura 5, es el resultado del tiempo de descubrimiento de ruta (latencia). A velocidades de 11 Mbps, ambos algoritmos tienen un comportamiento muy similar, pero a velocidades de 1 Mbps, GPSR muestra mayor tiempo de descubrimiento de ruta, esto es causado por la falta de diversidad espacial, que en el caso de LORA-CBF es realizado con el algoritmos de difusión basada en grupos.

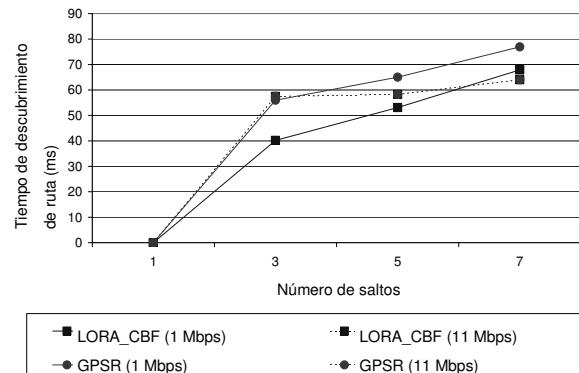


Figura 5. Tiempo de descubrimiento de ruta (ms)

La figura 6 muestra el sobre-procesamiento general, GPSR tiene un menor sobre-procesamiento que LORA-CBF a velocidades de 1 Mbps. Sin embargo, a velocidades de 11 Mbps, ambos algoritmos muestran resultados similares.

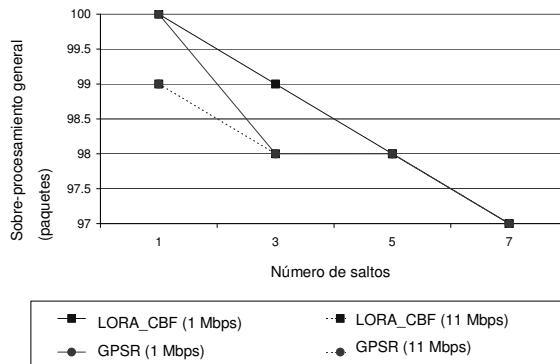


Figura 6. Sobre-procesamiento (paquetes)

La carga de enrutamiento se muestra en la figura 7; a velocidades de 11 Mbps, LORA-CBF tiene mayor carga de enrutamiento que GPSR, sin embargo a velocidades de 1 Mbps, LORA-CBF tiene un mejor desempeño debido a su mecanismo de formación de grupos.

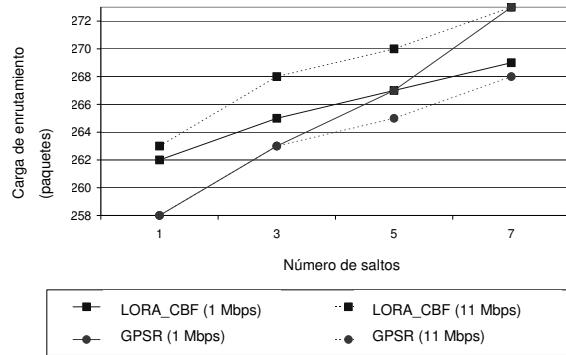


Figura 7. Carga de enrutamiento (paquetes)

## 6. CONCLUSIÓN

La regulación del flujo vehicular es indispensable en los sistemas cooperativos móviles, para reducir el congestionamiento vehicular. Para lograr lo anterior es necesario establecer una comunicación eficiente entre vehículos, lo que permitirá tener información actualizada y precisa de la situación de los mismos y de los vehículos vecinos.

En este trabajo de investigación, se simuló un escenario con 250 vehículos y el movimiento de los mismos de acuerdo a un modelo de tráfico microscópico, que asemeja en lo posible un comportamiento real. Se simularon además dos algoritmos que son fundamentales para vehículos móviles autónomos, un modelo de control de flujo vehicular en un solo carril (movimiento pelotón) y un algoritmo de comunicación entre vehículos móviles autónomos LORA-CBF que fue comparado con GPSR modificado. Los dos algoritmos de comunicación vehicular muestran comportamientos similares debido a sus características semejantes, ambos utilizan el mismo mecanismo de detección de vecinos, de retransmisión y predicción. En

resumen, con respecto a los algoritmos de enrutamiento se encontró que debido a la estructura jerárquica de LORA-CBF, éste permite un tiempo de descubrimiento de ruta menor y un mejor desempeño en la tasa de entrega de paquetes, pero incrementa el sobre-procesamiento de enrutamiento, la carga de enrutamiento y el sobre-procesamiento general de la red.

LORA-CBF ha sido validado en lo posible con los resultados de un experimento en una red de pequeña escala, posteriormente también se validó con los resultados de una red de gran escala al compararlo con dos prominentes algoritmos topológicos AODV y DSR. Podemos resumir que para lograr una comunicación eficiente en redes vehiculares altamente dinámicas es fundamental el desarrollo de los algoritmos de control de flujo vehicular y de comunicación entre vehículos móviles autónomos.

Nuestro trabajo a futuro es la simulación de un sistema de conducción automática sobre una autopista multi-carril.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación es apoyado en parte por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) dentro del proyecto de investigación en ciencia básica número J48391-Y.

## REFERENCIAS

- Bae-Young, K., and Nitin, H. V. (1998). Location-Aided Routing (LAR) in Mobile Ad Hoc Networks. Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 66-75.
- Baker, D. J., Ephremides, A., and Flynn, J. A. (1984). The Design and Simulation of a Mobile Radio Network with Distribute Control. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, pp.226-237.
- Basagni, S., Chalamtac, I., and Syrotiuk, V. R. (1998). A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM), International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 76-84.
- Carmine, F. D., Longo, G., Mazzulla, G., and Musolino, G. (2001). Experimental analysis of different simulation models for motorway traffic flow. Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, pp.675-680.
- Chiang, C., Wu, H., Liu, W., and Gerla M. (1997). Routing in Clustered Multihop Mobile Wireless Networks with Fading Channel. The IEEE Singapore International Conference on Networks, pp. 197-211.
- Clausen, T. and Jacquet P. (2003). Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). Request for Comments (work in progress). <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>
- Cvetkovski, Bobi., and Gavrilovska, Liljana. (1998). A simulation of a mobile Highway traffic. IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 1429-1433.

- Das, B., Sivakumar, R., and Bharghavan, V. (1997). Routing in Ad Hoc Networks Using a Spine. Proceedings in International Conference in Computer and Communication Networks, pp.376-380.
- Floyd, S. and Jacobson V. (1994). The Synchronization of Periodic Routing Messages. IEEE/ACM Transaction on Networking. Vol. 2, issue 2, pp. 122-136.
- Giordano, S., Stojmenovic I., and Blazevic L. (2003). Position Based Routing Algorithms for Ad-Hoc Networks: A Taxonomy. Ad Hoc Wireless Networking.
- Hoogendoorn, S. P., and Bovy, P. H. L. (2001). State-of-the-art of Vehicular Traffic Flow Modelling. Special Issue on Road Traffic Modelling and Control of the Journal of System and Control Engineering. Pp.283-303.
- Jacquet, P., Laouiti, A., Minet P., and Viennot, L. (2002). Performance of multipoint relaying in ad hoc mobile routing protocols. Pp. 387-398. Proceedings of the Second International IFIP-TC6 Networking Conference on Networking Technologies, Services, and Protocols; Performance of Computer and Communication Networks; and Mobile and Wireless Communications.
- Jonson, D., Maltz, D., Hu, Y. (2007). The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad-hoc Networks. Request for Comments (work in progress).  
<http://www.ietf.org/rfc/rfc4728.txt>
- Karp, B., and Kung, H. T.(2000). GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks. Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. Pp. 243-254.
- Krishna, P., Vaidya N. H., Chatterjee, M., and Pradhan, D. K. (1997). A Cluster-Based Approach for routing in Dynamic Networks. ACM SIGCOMM, Computer Communication Review, pp. 49-65.
- Li, J., Jannotti, J., De Couto, S. J., and Karger, D. R. (2000). A Scalable Location Service for Geographic Ad Hoc Routing. Proceedings of the 6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 120-130
- Logghe, S. (2003). Dynamic Modelling of Heterogeneous Vehicular Traffic. Ph. D. Thesis, K. U. Leuven, Belgium.
- Mauve, M., Widmer, J., and Hannes H. (2001). A survey on position-based routing in mobile ad-hoc networks. IEEE Network Magazine, 15(6):30-39.
- Mitelman, B. and Zaslavsky, A. (1999). Link State Routing Protocol with Cluster Based Flooding for Mobile Ad-hoc Computer Networks. Proceedings of the workshop on Computer Science and Information Technologies. Pp. 28-35.
- Ogier, R. G., Lewis, M. G., and Templin, F. L. (2004). Topology Dissemination based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF).  
<http://www.ietf.org/rfc/rfc3684.txt>
- Perkins, C. E. (2000). Ad hoc Networking. Addison Wesley.
- Perkins, C., Belding-Royer, E., Das, S. (2003). Ah-doc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. Request for Comments (work in progress).  
<http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>
- Rami, Y., Julien, C., Xavier, D., and Matthias, W. (2007). Locality-preserving distribute path reservation protocol for asynchronous cooperative mobile robots. Proceeding of the Eighth International Symposium of Autonomous Decentralized Systems, pp. 188-195.
- Santos, R. A., Edwards, R. M., and Seed N.L. (2002). Using the Cluster-Based Location Routing (CBLR)algorithm for exchanging information on a motorway. Fourth IEEE Conference on Mobile and Wireless Communication Networks, pp. 212-216.
- Santos, R. A., Edwards, A., Edwards, R. M., and Seed, N. L. (2005). Performance Evaluation of Routing Protocols in Vehicular Ad-hoc Networks. International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, vol. 1, nos. 1 y 2. pp.80-91.
- Sargent, Robert. G. (1992). Validation and Verification of Simulation Models. Proceedings of the Winter Simulation Conference. Pp.39-48.
- Schaumann, J. (2002). Analysis of the Zone Routing Protocol. Routing. Request for Comments (work in progress).  
<http://www.netmeister.org/misc/zrp/zrp.pdf>
- Schmidt, J. W. (1981). Fundamental of Digital Simulation Modelling. Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp. 13-21.
- Sivakumar, R., Das, B., and Bharghavan, V. (1998). Spine Routing in Ad Hoc Networks. ACM/Baltzer Cluster Computing Journal. Pp.237-248.
- Vilalta, R. et al. (2002). Predictive Algorithms. Management of Computer Systems, vol. 41, num. 3.
- Zou, X., Ramamurthy, B., and Magliveras, S. (2002). Routing Techniques in Wireless Ad Hoc Networks – Classification and Comparison. Proceedings of the Sixth World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics.