

DESARROLLO DE UNA INTERFAZ DE PROGRAMACIÓN DE APLICACIONES PARA EL COMPORTAMIENTO REAL VEHICULAR EN INTERSECCIÓN SEMAFORIZADA, EN EL SIMULADOR AIMSUN

Development of an application programming interface for real vehicular behavior at signalized intersections in AIMSUN simulator

Pedro Apolinar Molina González¹, Saúl Antonio Obregón Biosca¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia
pedro.a.molina.glz@gmail.com

RESUMEN

En ingeniería de tránsito, los simuladores computacionales del comportamiento vehicular son empleados para crear representaciones digitales útiles, analizar la situación actual de la red carretera y así evaluar propuestas de mejoras ante conflictos viales. En referencia a las representaciones gráficas de los comportamientos vehiculares, los programas de simulación usan modelos matemáticos que surgen de la observación del comportamiento vehicular en situaciones reales. En los análisis de intersecciones semaforizadas con los programas actuales se observa que las velocidades vehiculares no se modifican cuando los vehículos han tomado la decisión de pasar el semáforo, cuando la señal cambia de verde a amarillo, mientras que en situaciones reales algunos usuarios aumentan la velocidad al inicio de la fase de amarillo provocando que crucen la intersección en rojo. El objetivo de la presente investigación es la creación de una interfaz de programación de aplicaciones (API) para modificar el comportamiento de la simulación en una intersección semaforizada, en el simulador AIMSUN. Para trabajar con aplicaciones externas, se realizó el código de programación en Visual Studio mediante el los módulos del simulador, y se utilizó lenguaje C++ para crear una biblioteca de enlace dinámico (DLL). Los resultados obtenidos demuestran que el comportamiento vehicular en el simulador puede ser modificado para que los vehículos aceleren ante el cambio de fase verde-amarillo y cuando se encuentran a menos de 50 m hasta la línea de parada, apegándose así al comportamiento real.

Palabras clave

AIMSUN, API, comportamiento vehicular, intersección semaforizada, simulación

ABSTRACT

In traffic engineering, vehicular behavioral computer simulators are used to create useful digital representations for the analysis of the road network

current situation and the evaluation of proposals for solutions of road conflicts. In order to perform graphic representations of vehicular behaviors, simulation programs use mathematical models that arise from the observation of vehicle behavior in real situations. Analyzing traffic intersections with current programs, it is observed that vehicular speeds are not modified when vehicles have decided to pass the traffic light once the signal changes from green to yellow, while in real situations some users increase the speed at the beginning of the yellow phase causing them to cross the intersection in red. The objective of the present research is the creation of an application programming interface (API) to modify the behavior of the simulation at a signalized intersection in the simulator AIMSUN. By using the simulator modules to work with external applications, the programming code in Visual Studio was made using C++ language to create a dynamic-link library (DLL). The results obtained show that vehicle behavior in the simulator can be modified so that vehicles accelerate before the green-yellow phase change when they are less than 50 m far from the stop line to adhere to the actual behavior.

Keywords

AIMSUN, API, vehicle behavior, signalized intersections, simulation

INTRODUCCIÓN

Las lesiones por accidentes de tráfico han ido en aumento en las últimas décadas. Para el 2010 éstas representaban la octava causa de muerte en el mundo, provocando 1.3 millones de muertes de acuerdo con Yan *et al.* (2016). Según Anjana y Anjaneyulu (2015), en distintas ciudades el 24% de los accidentes de tráfico ocurre en intersecciones semaforizadas, donde un 40% de estos casos está relacionado con lesiones graves o muertes. Algunos de los factores que influyen en la seguridad de intersecciones semaforizadas, son las medidas de control, la geometría, el tráfico, los usuarios, los vehículos y los factores ambientales (Bauer y Harwood, 2000; Chin



y Quddus, 2003; Kumara y Chin, 2003; Tay y Ri-faat, 2007; Vogt, 1999; Yan *et al.*, 2005). Dichos elementos se vinculan con el comportamiento vehicular en las intersecciones semaforizadas, de manera específica, cuando no se respetan las señales semaforizadas provocando que diferentes flujos vehiculares ocupen la intersección al mismo tiempo. Estas situaciones se conocen como “Pasarse la luz amarilla” o *Yellow Light Running* (YLR) y “Pasarse la luz roja” o *Red Light Running* (RLR). De acuerdo con Galatioto *et al.*, (2012), el estudio del comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas ha aumentado en las últimas décadas debido al costo humano y financiero, tanto para los usuarios como para las administraciones gubernamentales.

Para los ingenieros y especialistas en el transporte, los programas de microsimulación han ganado aceptación como herramientas para la evaluación y análisis de sistemas inteligentes de transporte y otros mecanismos de control de tráfico, así como para el manejo e implementación de medidas de seguridad (Shahzad y Ranjitkar, 2009). De manera similar, Fellendor y Vortisch (2010) mencionan que los simuladores de tráfico son instrumentos indispensables para la planeación. Según Barceló (2010), la habilidad de las simulaciones de tráfico, para emular la variación temporal de los fenómenos de tráfico, ocasiona que sean herramientas únicas para capturar la complejidad de sistemas de tráfico. Es así que el incremento de las tecnologías de procesamiento y la evolución de programas computacionales, enfocados a la ingeniería y al avance de sistemas de transportes inteligentes, han generado que los simuladores de tráfico se conviertan en uno de los medios más usados para el análisis del tráfico, y para el diseño y evaluación de sistemas. En los últimos años, la simulación de tráfico, también conocida como simulación microscópica de tráfico, ha pasado de ser un tema académico a una necesidad en el campo laboral. Una amplia variedad de simuladores computacionales de tráfico está disponible en el mercado y es empleada por investigadores, consultores, así como por agencias públicas.

En la actualidad, uno de los simuladores con mayor aceptación es resultado de un programa a largo plazo de la Universidad Politécnica de Cataluña, llamado *Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks* o, simplemente, AIMSUN (Casas *et al.*, 2010). La área de aplicación para AIMSUN es la ingeniería de tráfico tanto fuera de línea y, más recientemente, como apoyo en las decisiones de operación de tráfico en tiempo real (en línea). En cualquiera de los casos, el uso de AIMSUN aporta soluciones a corto y mediano plazo para planeación y problemas de operación. Los principales modelos de los simuladores computacionales se basan en la descripción de los factores que influyen en el movimiento individual de los vehículos dentro de la red. Los primeros se enfocaron en la descripción del seguimiento vehicular y del cambio de carril, dentro de los cuales se emplearon a su vez modelos para influir en la velocidad, la aceleración y desaceleración. En cambio, el AIMSUN utiliza los modelos propuestos por Gipps para el seguimiento vehicular y el cambio de carril (Gipps, 1980; Gipps, 1986).

Para la simulación vehicular en AIMSUN es necesario establecer planes de control fijo en cada intersección de la red (Casas *et al.*, 2010), ya que el comportamiento vehicular durante la simulación es ideal, es decir, los vehículos obedecen siempre las señales del semáforo (disminuyen su velocidad en la etapa de luz amarilla y se detienen completamente antes de la línea de parada cuando la señal en rojo se ha activado). Es cierto que diferentes tecnologías se han desarrollado para que los conductores obedezcan las señales y se eviten situaciones de YLR y RLR, como son los mensajes de advertencias, ajustes dinámicos en las señales o, incluso, tecnologías relacionadas con vehículos autónomos (Bonneson *et al.*, 2002; Ragland y Zabyshny, 2003; Neale *et al.*, 2007). Sin embargo, según Ren *et al.* (2016), antes de la aplicación de metodologías preventivas es necesario predecir los comportamientos de YLR y RLR.

De acuerdo con el *Manual Interfaz de programación de aplicaciones* (API) y AIMSUN Mi-

crossimulator (API, 2013), la tendencia actual enfocada en el desarrollo de nuevos sistemas de control inteligentes genera que los simuladores se queden rezagados por su incapacidad de incluir modelos específicos, basados en enfoques dirigidos a situaciones actuales. Por medio del uso de una API, la cual puede ser empleada en algunos simuladores actuales, es posible que el usuario realice cambios en la simulación, como el comportamiento de los conductores, planes de control, entre otros (Fang, 2008). En cuanto a lo anterior, Vilarinho *et al.* (2014) y Vilarinho y Tavares (2014) emplearon APIs para mejorar la capacidad de simulación del AIMSUN; optimizaron los tiempos semafóricos del plan de control con información dinámica del tráfico. Ntousakis *et al.* (2015) usaron APIs en AIMSUN para poder evaluar la comodidad y seguridad de un plan control adaptativo en una intersección. De manera similar, con el uso de una API, Rauh *et al.* (2016) mejoraron el plan de control semafórico en AIMSUN cuando se tiene la presencia de vehículos autónomos.

La elección de las variables que interviene en el comportamiento y en la toma de decisiones de los conductores, puede ser explicada a partir del modelo conceptual propuesto por Summala (1996) que describe la tarea de conducir mediante tres dimensiones. La primera hace referencia a la jerarquía funcional que comprende la elección vehicular, la elección de la ruta, la navegación, la dirección y el control vehicular (en la parte derecha de la Figura 1). En la segunda dimensión se incluyen las capacidades del conductor como la dirección en el carril, el control o la capacidad de evadir obstáculos, el rebase y otras maniobras, la conducción en intersecciones, mantener la distancia entre los vehículos, etc. (parte inferior de Figura 1). La última dimensión se enfoca en explicar la relación entre el control de la percepción del motor, que se realiza de manera automática, y la consciente toma de decisiones y el monitoreo de niveles. En esta dimensión también se incluyen variables psicológicas como el estrés del conductor y la influencia que otros conductores podrían tener en su comportamiento, entre otras

interacciones. Mientras más alta sea la tarea en la jerarquía funcional, más consciente será la toma de decisiones y la supervisión aplicada, es decir, dependiendo del nivel de habilidades y automatización, los conductores incluso aprenden a tomar decisiones relacionadas con el viaje y la navegación habitual, sin la necesidad de ser conscientes.

Distintas tareas son consideradas en la investigación del tráfico. El control de la velocidad y el tiempo están directamente relacionados con la movilidad, el problema fundamental y una de las metas básicas de alto nivel en el transporte. Al incrementar la velocidad por las mejoras en los vehículos y los caminos, también lo hacen las distancias que pueden ser alcanzadas dentro de tiempos razonables, por lo que las decisiones de viaje son ampliamente basadas en el tiempo y otros factores de comodidad. Por otro lado, la velocidad influye en el objetivo motivacional de conducir; las decisiones de viaje establecen el nivel de velocidad deseada, junto con el costo de conducción y los límites de velocidad. De acuerdo con Summala (1996), el control de la velocidad sirve como herramienta de control primario para prácticamente todas las tareas de nivel de conducción, es por ello que los conductores aprenden a ajustar la velocidad para mantener una posición en una línea y las distancias entre vehículos.

En una intersección semaforizada, cuando un conductor se aproxima a una intersección y observa en la señal semafórica el cambio de verde a amarillo, es necesario que tome la decisión de detenerse o seguir. Si el conductor decide seguir, se encontrará ante una situación de YLR o RLR. Sin embargo, dependiendo de la velocidad del vehículo, los tiempos semafóricos y la distancia hasta la intersección, se enfrentará a cuatro posibles situaciones: 1) "Debería avanzar", en la que el vehículo podría pasar la intersección continuando con la velocidad con la que viaja o acelerando de manera moderada antes de que la señal cambie a rojo, pero no podría parar antes de la intersección de manera cómoda o segura, 2) "Debería parar", el vehículo no puede cruzar

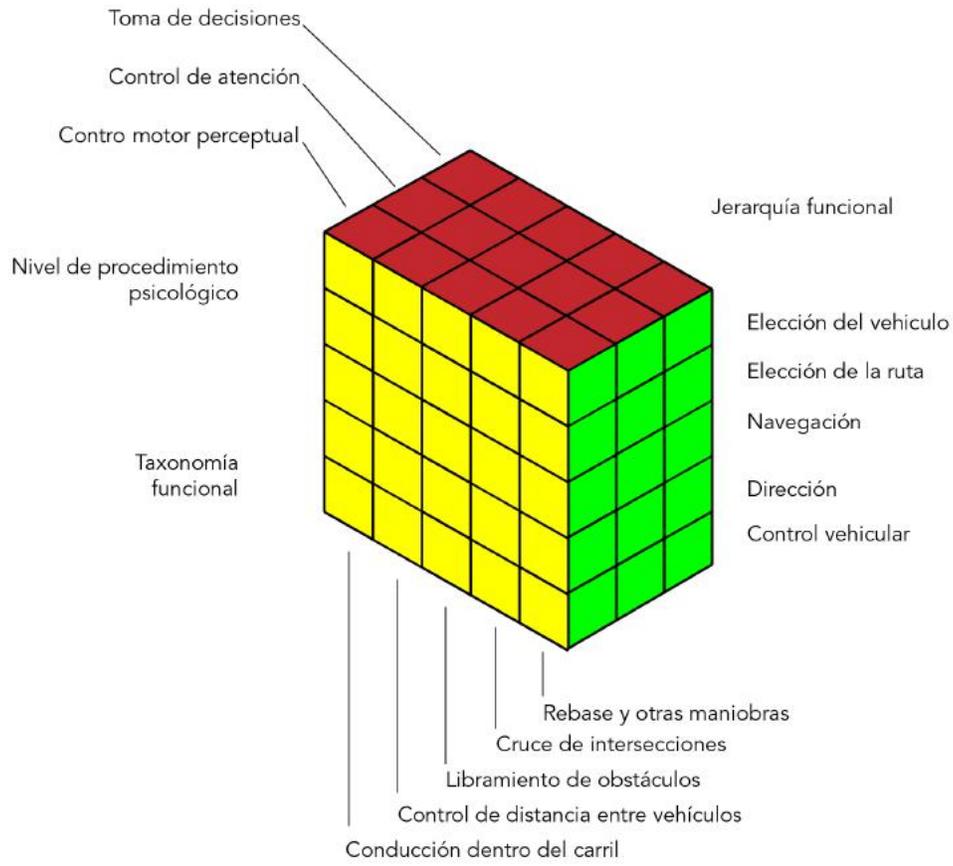


Figura 1. Modelo Driver Task Cube para la interacción de variables durante el comportamiento vehicular

la intersección antes de que el semáforo cambie a rojo, pero puede detenerse de manera segura antes de la línea de parada con una tasa de desaceleración adecuada, 3) "Zona de dilema" (ZD), los vehículos no pueden detenerse con una desaceleración segura ni cruzar la intersección con la velocidad actual ni aumentándola con una aceleración confortable sin cometer RLR, y 4) "Zona de opción" (ZO), el vehículo puede detenerse totalmente con una tasa de desaceleración adecuada o cruzar la intersección con su velocidad actual o acelerando de manera confortable antes de que la señal indique rojo (Lu *et al.*, 2015). Ante esto, Elmitiny *et al.* (2010) encontraron que dos de las variables más significativas, para que los conductores realicen maniobras de YLR y RLR, son la distancia a la que el vehículo se encuentra de

la línea de parada cuando el semáforo inicia la indicación de amarillo, y la velocidad con la que se desplaza el usuario. Los resultados obtenidos por Elmitiny *et al.* (2010) indican que el 80.9% de los vehículos, que se encuentran a una distancia de 87 m o menor, cruzarán la intersección, mientras que el 92.2% de los vehículos, a una distancia de 113 m o mayor, se detendrán antes de la línea de parada. Por otro lado, para los vehículos que se encuentren entre dichas distancias, la velocidad será un factor determinante: más del 80% de los vehículos, que transiten a una velocidad igual o menor a 80 km/h, se detendrá antes de la intersección, mientras que más del 63% de los que transitan a una velocidad mayor cruzarán la intersección.

METODOLOGÍA

La metodología de esta investigación se dividió en tres etapas (véase figura 2). En la primera se creó el escenario de una intersección semaforizada en AIMSUN. En la segunda se empleó una API para obtener información de los vehículos sin afectar su comportamiento. En la tercera parte se modificó el comportamiento del simulador mediante la implementación de una API.

Escenario de intersecciones semaforizadas en AIMSUN

Se creó un nodo de intersección de cuatro secciones en AIMSUN, procurando que dichas secciones tuvieran una longitud igual o mayor a 100 m y

que los carriles contaran con un ancho mayor de 3 m. Se creó un plan semafórico con un ciclo de 144 segundos para analizar 25 ciclos en una hora de escenario simulado. Los centroides y las matrices Origen-Destino (OD) se establecieron de tal manera que los vehículos sólo realicen movimientos frontales (ningún vehículo da vuelta a la derecha o a la izquierda en la intersección). Se empleó solamente un tipo de vehículo cargado a la demanda de tráfico cuyas características se presentan en la Tabla 1.

Obtención de información, mediante API, del comportamiento vehicular

Al emplear el programa Visual Studio se creó una Biblioteca de Enlace Dinámico (DLL) que el AIM-

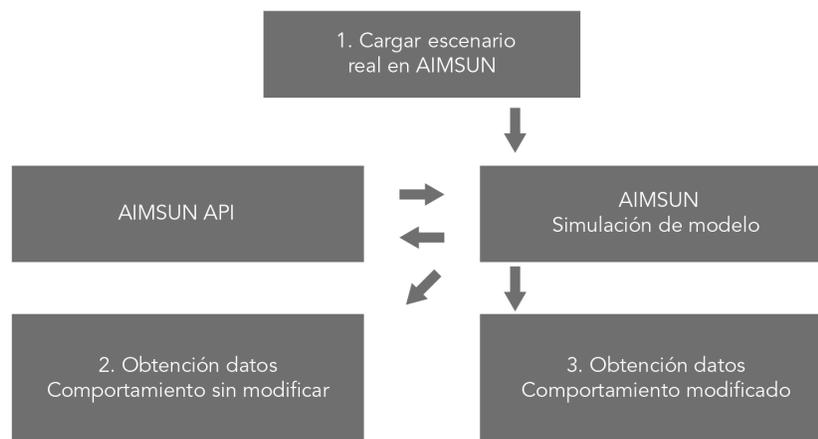


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología

Tabla 1. Características de vehículo tipo cargado en AIMSUN para la simulación

	Media	Desviación	Mínimo	Máximo
Longitud (m)	4	0.5	3.5	4.5
Anchura (m)	2	0	2	2
Velocidad máxima deseada (km/h)	110	10	80	150
Aceleración máxima (m/s ²)	3	0.2	2.6	3.4
Desaceleración normal (m/s ²)	4	0.25	3.5	4.5
Desaceleración máxima (m/s ²)	6	0.5	5	7
Aceptación de velocidad	1.1	1	0.9	1.3
Distancia mínima entre vehículos	1	0.3	0.5	1.5



SUN interpreta como una API para leer la información de los vehículos en cada paso de la simulación. El paso de la simulación se estableció en 0.1 segundos para obtener la información de los vehículos aproximadamente cuando se han desplazado un metro. La API está conformada por seis funciones para comunicarse con el modelo de AIMSUN:

- `Int AAPILoad ()`: En el escenario del modelo de AIMSUN se ha cargado la ubicación del archivo DLL y este comando ejecuta la API seleccionada.
- `int AAPInit ()`: Inicia la API. En esta sección pueden incluirse parámetros que serán empleados en las siguientes funciones.
- `Int AAPIManage (double time, double timeSta, double timeTrans, double acycle)`: Se declaran las variables que controlarán la ejecución del código. El código cargado en esta sección se ejecutará antes del paso de la simulación.

- `int AAPPostManage (double time, double timeSta, double timeTrans, double acycle)`: La única diferencia entre este punto y el anterior es que éste se ejecutará posterior al paso de la simulación.
- `int AAPIFinish ()`: Se finaliza la API.
- `int AAPILoad ()`: Se cierra la aplicación en el AIMSUN.

En la Figura 3 se puede apreciar la interacción entre el AIMSUN y la API para realizar la simulación. El código empleado en esa etapa fue cargado en la sección `AAPIManage (...)`, de tal manera que se solicitó la información de los vehículos antes de efectuar el paso de la simulación. Los datos obtenidos fueron los siguientes: Identificador (ID) del vehículo, ID de la sección, número de carril, distancia hasta la intersección y la velocidad.

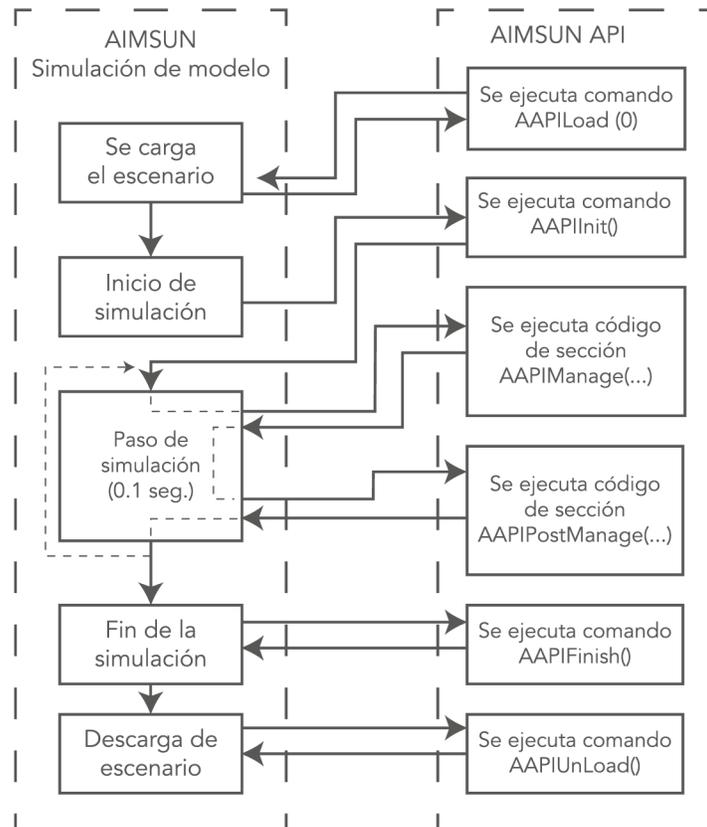


Figura 3. Diagrama de flujo de la interacción entre el AIMSUN y la API

Modificación del comportamiento vehicular en AIMSUN mediante API

Fue creada una API, incluyendo el código en la función AAPIManage (...), para realizar las siguientes acciones: 1) apagar el plan de control de los semáforos, 2) implementar un control manual de los semáforos, es decir, definido por la API, 3) instrumentar los vehículos de manera que aceleren cuando inicie la fase de amarillo y se encuentren a menos de 87 m de la intersección.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De los 472 vehículos creados durante la simulación se encontró que se presentaron 14 casos de YLR y 5 de RLR para un escenario promedio. En la Figura 4a se puede observar que, en todos los casos en los que se mostraron comportamientos de YLR, los vehículos estaban a menos de 40 m hasta el punto de parada de la intersección cuando el semáforo cambiaba la señal de verde a amarillo, y su velocidad media estuvo cerca de los 53 km/h. Mientras que en la Figura 4b se exponen los casos en los que los vehículos cruzaron la intersección cuando la señal del semáforo indicaba luz roja, distinguiéndose que los vehículos ubicados a menos de 87 m cruzan la intersección, para ellos las velocidades tienen una mayor varianza.

Puede observarse, en la Figura 4, que los vehículos no modifican su velocidad una vez que han decidido cruzar la intersección cuando el semáforo indica amarillo o rojo.

Las distancias de parada empleadas para el diseño de carreteras están relacionadas con la velocidad a la que los vehículos circulan. Para velocidades de operación de 45 a 60 km/h, las distancias de parada segura se encuentran entre 55 y 87 m. Para la velocidad promedio de los vehículos, con un comportamiento de YLR (53 km/h), se requieren de aproximadamente 70 m para realizar una maniobra de parada segura, la distancia hasta la línea de parada de todos los conductores en estos casos fue menor por lo que la decisión de cruzar la intersección era adecuada.

Un comportamiento más cercano a la realidad sería que los vehículos aumentaran su velocidad cuando la distancia y la velocidad son inadecuadas para frenar, debido a que manteniendo la velocidad es probable que se encuentren en la intersección cuando otro flujo vehicular se encuentre en verde. De manera similar, las distancias hasta la línea de parada y las velocidades de los vehículos de los casos de RLR no eran adecuadas para frenar con seguridad, sin embargo, estos podrían presentar un mayor riesgo de colisión ya que dos flujos vehiculares se podrían encontrar dentro de la intersección.

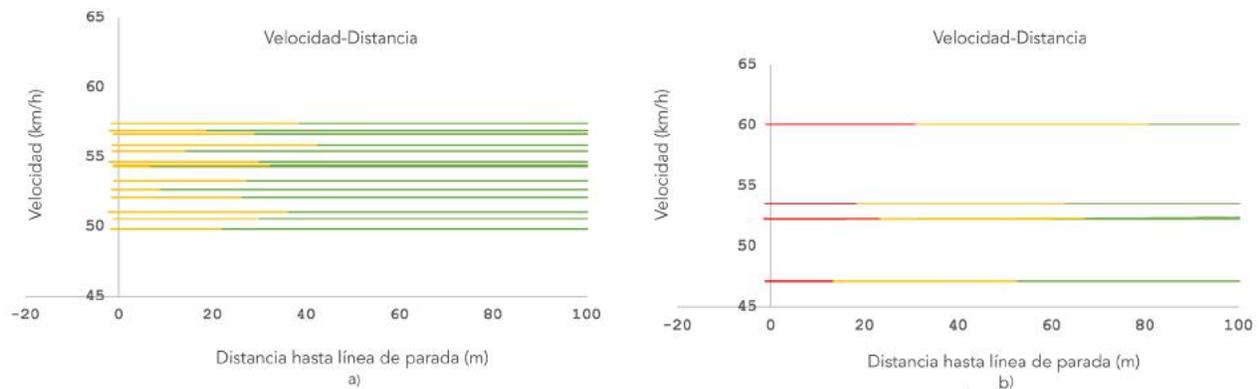


Figura 4. a) Comportamiento de vehículos que presentaron YLR,
b) Comportamiento de vehículos que presentaron RLR



En la Figura 5a se observan los comportamientos de vehículos simulados cuando la distancia a la línea de parada es menor a 60 m y el semáforo realiza el cambio de señal amarilla a roja. No se aprecia un cambio en la velocidad de los vehículos hasta aproximadamente 30 m antes de la línea de parada, no importando la diferencia de las velocidades de operación. En la Figura 5b se distingue el mismo comportamiento, aunque para los vehículos que se encuentran en la fase de rojo y pueden ver el semáforo desde una distancia mayor a 50 m. Estos no modifican su velocidad hasta encontrarse a menos de 30 m de la línea de parada o del último vehículo estacionado.

En la Figura 6 se presentan las trayectorias de vehículos, instrumentados mediante la API para modificar su comportamiento. Se exhiben algunos casos de YLR en los que se aumentaron las velocidades para que los vehículos crucen la intersección antes de que el semáforo les indique verde a los otros flujos vehiculares.

CONCLUSIONES

Los simuladores computacionales de tránsito son empleados en la actualidad como herramientas básicas para el análisis de las vialidades, si bien ayudan a los investigadores a comprender el comportamiento vehicular dentro de las redes, el de los vehículos simulados está lejos de ser una copia fiel de la realidad. A través del análisis del comportamiento de los vehículos simulados en una intersección semaforizada, mediante AIMSUN, se observó que los vehículos mantienen velocidades constantes incluso cuando han decidido no obedecer las indicaciones de reducir la velocidad (fase amarilla) y de detenerse (fase roja) emitidas por el semáforo. Por otra parte, se vislumbró que las distancias de frenado, para los vehículos simulados, parecen ser una constante independiente de la velocidad de operación y de las indicaciones del semáforo. Los conductores en una intersección real presentan un comportamiento variado.

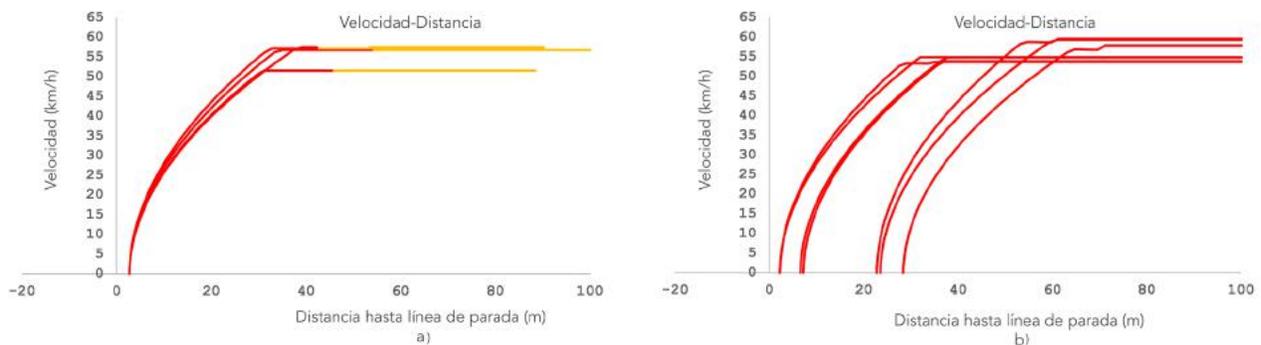


Figura 5. Comportamiento de frenado de vehículos cuando: a) Se encuentran a corta distancia y el semáforo cambia a rojo, b) Pueden ver la señal roja desde una distancia mayor a 50 m

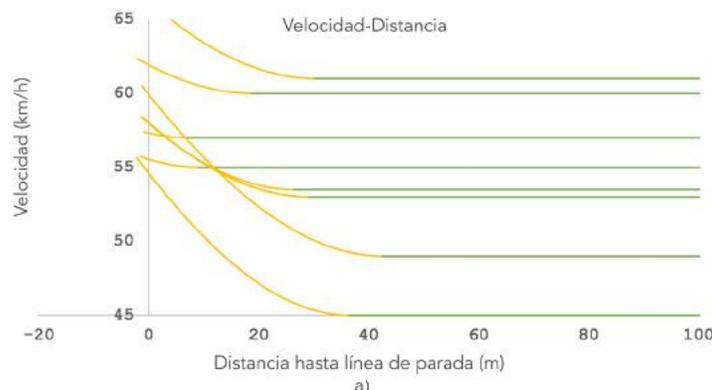


Figura 6. Comportamiento de vehículos instrumentados mediante la API

A partir de esta investigación se desarrolló una API para modificar el comportamiento vehicular simulado en AIMSUN. Se tomaron parámetros como la distancia a la que los vehículos se encuentran de la línea de parada, así como la velocidad a la que se acercan a la intersección para tomar la decisión de obedecer o no las indicaciones del semáforo y realizar aceleración o desaceleración. Con el fin de tratar de emular un comportamiento real.

Sin embargo, el comportamiento real es mucho más complejo, por lo que se debe profundizar en éste para encontrar los factores que intervienen en la toma de decisiones del conductor. Al implementar dichos parámetros, mediante una API en el simulador AIMSUN, será posible hacer uso de los parámetros estadísticos del simulador para evaluar la seguridad de la intersección y así comenzar a usar medidas de prevención de accidentes.

REFERENCIAS

- ANJANA, S. y Anjaneyule, M.V.L.R. (2015). Safety analysis of urban signalized intersections under mixed traffic. *Journal of safety research*. Vol. 52, pp. 9-14.
- BARCELÓ, J (ed.). (2010). Models, traffics models, simulation, and traffic simulation. *Fundamentals of traffic simulation*. Barcelona, España: Springer, pp. 1-62.
- BAUER, K. M. y Harwood, D. W. (2000). Statistical models of At-Grade Intersections Accidents-Addendum (FHWA report-99-094). Washington D.C.: FHWA.
- Bonneson, J., Middleton, D., Zimmerman, K., Charara, H. y Abbas, M. (2002). Intelligent detection-control system for rural signalized intersections (No. FHWA/TX-03/4022-2).
- CASAS, J., Ferrer, J., García, D., Perarnau, J. y Torday, A. (2010). Traffic Simulation with AIMSUN. *Fundamentals of traffic simulation*. Barcelona, España: Springer, pp. 173-232.
- CHIN, H. C. y Quddus, M. A. (2003). Applying the random effect negative binomial model to examine traffic accident occurrence at signalized intersections. *Accident Analysis and Prevention*. Vol. 35, pp. 253-259.
- ELMITINY, N., Yan, X., Radwan, E., Russo, C. y Nashar, D. (2010). Classification analysis of driver's stop/go decision and red-light running violation. *Accident Analysis and Prevention*. Vol. 42, pp. 101-111.
- FANG, C. (2008). Development of an Application Programming Interface (API) in Simulation to Evaluate Real-Time Signal Control. *Plan, Build, and Manage Transportation Infrastructures in China*. Congress (ISSTP) ASCE, pp. 419-432.
- FELLENDOERF, M. y Vortisch, P. (2010). Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM. *Fundamentals of traffic simulation*. Barcelona, España: Springer, pp. 63-94.
- GALATIOTO, F., Giuffrè, T., Bell, M., Tesoriere, G. y Campisi, T. (2012). Traffic Microsimulation Model to Predict Variability of Red-Light Running Influenced by Traffic Light Operations in Urban Area. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Vol. 53, pp. 872-880.
- GIPPS, P. (1980). A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, pp. 105-111.
- GIPPS, P. (1986). A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Part B: Methodological*. Vol. 20, pp. 403-414.
- KUMARA, S. S. P. y Chin, H. C. (2003). Modeling Accident Occurrence at Signalized Tee Intersections with Special Emphasis on Excess Zeros. *Traffic Injury Prevention*. Vol. 4(1), pp. 53-57.
- LU, G., Wang, Y., Wu., X. y Liu, H. (2015). Analysis of yellow-light running at signalized intersections using high-resolution traffic data. *Transportation Research Part A: A Policy and Practice*. Vol. 73, pp. 39-52.



- NEALE, V. L., Perez, M.A., Lee, S. E. y Doerzapf, Z.R. (2007). Investigation of Driver-Infrastructure and Driver-Vehicle Interfaces for an Intersection Violation Warning System. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. Vol. 11(3), pp. 133-142.
- NTOUSAKIS, I., Nikolos, I. y Papageorgiou, M. (2015). On Microscopic Modelling of Adaptive Cruise Control Systems. *Transportation Research Procedia*. Vol. 6, pp. 111-127.
- RAGLAND, D. R. y Zabyshny, A. A. (2003). Intersection Decision Support Project: Taxonomy of Crossing-Path Crashes at Intersections using GES 2000 Data. *Safe Transportation Research & Education Center*.
- RAUH, E., Castelan, R. y Kraus, W. (2016). Intersection control for automated vehicles with MILP. *IFAC-PapersOnLine*. Vol. 49(3), pp. 37-42.
- REN, Y., Wang, Y., Wu, X., Yu, G. y Ding, C. (2016). Influential factors of red-light running at signalized intersection and prediction using a rare events logistic regression model. *Accident Analysis and Prevention*. Vol. 95, pp. 266-273.
- SHAHZAD, M. y Ranjitkar, P. (2009). Capacity Analysis of Signalised Intersection using Microsimulation. Auckland, New Zealand: 32nd Australasian Transport Research Forum: the growth engine: interconnecting transport performance, the economy and the environment.
- SUMMALA, H. (1996). Accident risk and driver behavior. *Safety Science*. Vol. 22, pp. 103-117.
- TAY, R. y Rifaat, S.M. (2007). Factors contributing to the severity of intersection crashes. *Journal of Advanced Transportation*. Vol. 41(3), pp. 245-265.
- VILARINHO, C., Soares, G., Macebo, J., Tavares, J y Sossetti, R. (2014). Capability-enhanced AIMSUN with Real-time Signal Timing Control. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. Vol. 111, pp. 262-271.
- VILARINHO, C. y Tavares, P. (2014). Real-time Traffic Signal Settings at an Isolated Signal Control Intersection. *Transportation Research Procedia*. Vol. 3, pp. 1021-1030.
- VOGT, A. (1999). Crash Models for Rural Intersections: Four-Lane by Two-Lane Stop Controlled and Two-Lane by Two-Lane signalized. Federal Highway Authority. (FHWA report 99-128). Washington D.C.: FHWA.
- YAN, F., Li, B., Zhang, W. y Hu, G. (2016). Red-light running rates at five intersections by road user in Changsha, China: An observational study. *Accident Analysis and Prevention*. Vol. 95, pp. 381-386.
- YAN, X., Radwan, E. y Abdel-Aty, M. (2005). Characteristics of rear-end accidents at signalized intersections using multiple logistic regression model. *Accident Analysis and Prevention*. Vol. 37, pp. 983-995.