

# Control de tráfico basado en agentes inteligentes

José A. Castán, Salvador Ibarra, Julio Laria, Javier Guzmán, Emilio Castán

**Resumen**—La tecnología de agentes se ha demostrado ser una ciencia computacional avanzada capaz de lograr mejoras sustanciales en un rango de aplicaciones debido a su paradigma de la estructura de toma de decisiones basado en el razonamiento cognitivo. En este sentido, el artículo presenta el desarrollo de una metodología novedosa que permite incluir un modelo formal basado en agentes autónomos e inteligentes capaces de manipular las fases de los ciclos en una infraestructura de semáforos de acuerdo a las exigencias y limitaciones de la carretera. Este proceso mejora efectiva e inmediata de la calidad del servicio en una intersección, aumentando el rendimiento de la movilidad de los vehículos y mejorando la generación de emisiones, cuando los vehículos se paran en un semáforo rojo. Para corroborar esto, el artículo presenta algunos experimentos con el fin de comparar la metodología propuesta contra una infraestructura pre-programada. Por último, se presentan las conclusiones a destacar la eficacia y la utilidad de la metodología desarrollada con la intención de alcanzar el control de tráfico adecuado de una ciudad en expansión.

**Palabras Clave**—Sistemas inteligentes, simulación y optimización de vehículos, agentes autónomos.

## Traffic control based on intelligent agents

**Abstract**—Agent technology has been demonstrated to be an advance computational science capable to achieve substantial improvements in a cover range of applications because of its paradigm of decision-making structure based on cognitive reasoning. In this sense, the paper introduces the development of a novel methodology that allows including a formal model founded on autonomous and intelligent agents capable to manipulate the phases of the cycles in a traffic lights infrastructure according to the requirements and constraints of the road. This process improves effectively and immediately the quality of the service in an intersection, increasing the performance of the vehicular mobility and the generation of emissions, when vehicles are stopped in a red light. To corroborate this, the article presents some experiments in order to compare the proposed methodology against a pre-

Manuscrito recibido 18 de marzo de 2014, aceptado para su publicación 27 de abril de 2014, publicado el 15 de noviembre de 2014.

José A. Castán (autor correspondiente), Salvador Ibarra, Julio Laria y Javier Guzmán están afiliados a la Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Ingeniería “Arturo Narro Siller”, Tamaulipas, México (correo: {jacastan, sibarram, jlaria, jguzmano}@uat.edu.mx).

Emilio Castán está afiliado con el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, México (correo: ecastan@yahoo.com.mx).

programmed infrastructure. Finally, conclusions are presented to emphasize the effectiveness and usefulness of the developed methodology whith the main intention of achieving an adequate traffic control of an expanding city.

**Index terms**—Intelligent systems, vehicular simulation and optimization, autonomous agents.

### I. INTRODUCCIÓN

EN la actualidad, las denominadas ciudades de primer mundo enfrentan un sin fin de retos, entre los cuales, el control de tráfico representa uno de los más complejos y significativos. De ahí, que una de las principales inquietudes de los administradores y representantes de las ciudades modernas es lograr el control óptimo de sus vialidades. Por lo tanto, pensar en la tecnología e innovación que les permita conocer dichos retos y al mismo tiempo les represente nuevas oportunidades de mejora, representará un avance significativo en la calidad de vida de sus usuarios.

En este sentido, la innovación que se menciona, se refiere a plataformas que se centran en retos y esfuerzos específicos donde los gobiernos deben asumir un papel para realizar acciones a través de políticas, regulaciones, o medidas fiscales que permitan atacar dichos problemas directamente. Situar la definición de *vialidad* es necesario para ubicar todo lo que esta conlleva, por lo tanto, una vialidad se puede definir como el área o espacio en el que un vehículo puede circular para movilizarse de un lugar a otro. En definitiva, el gran crecimiento demográfico de nuestra civilización sugiere que el consumo y uso de los medios de transporte se incrementa. Tal efecto es visible, cuando al realizar una trayectoria que implica poca distancia, el tiempo del viaje es significativamente más elevado del que debiera ser, esto debido a aspectos como lo son: la congestión vial, una mala planeación de las vialidades o unos de los principales problemas estudiados en este artículo, la sincronización semafórica.

Para ofrecer soluciones a estos hechos, en [1] se destaca que durante los últimos 50 años se ha desarrollado una amplia gama de teorías y modelos para optimizar el flujo del tráfico como herramientas para solucionar los problemas económicos y sociales que se originan como consecuencia de una alta demanda del servicio vial.

De hecho, la SCT<sup>1</sup> en México propone un estándar que permite medir la calidad del servicio en las intersecciones

<sup>1</sup> <http://www.sct.gob.mx/>

viales, el cual es un auxiliar para que los expertos en control de tráfico sean capaces de identificar las áreas de oportunidad de mejora, en la clásica búsqueda de ofrecer al usuario una mejor manera para realizar sus operaciones de transporte. En ese sentido, las intersecciones juegan un papel importante en el desempeño de una red de transporte urbana, ya que representan el punto de convergencia del tránsito vehicular. Además, las intersecciones son las causantes de los cuellos de botella de una red urbana y factores críticos de la capacidad vehicular, la eficiencia y la seguridad de la misma. Esto se debe a que una intersección comprende tanto el área donde dos o más calles se unen (denominado cruce) como todo el espacio destinado a facilitar los movimientos de los vehículos que circulan por ella. En particular, de acuerdo con [3] el estudio de una intersección de dos o más calles, es un ingrediente sustancial para lograr la optimización global del flujo vehicular en una red urbana.

A la luz de esto, debemos prestar atención especial al uso de técnicas revolucionarias como herramienta que permitan solucionar problemas de transporte estático, generando una evolución hacia sistemas de cooperación, los cuales deberían ser suficientemente flexibles para ser aplicados en entornos dinámicos [2, 5, 6]. Tal afirmación es considerada debido a que la dinámica del entorno de una vialidad, es considerada no como un aspecto de movimiento sino en relación a como las condiciones de la vialidad van cambiando conforme el tiempo avanza, efecto que fácilmente se puede apreciar en el comportamiento de una intersección. Por lo tanto, al día de hoy han surgido algunas líneas de implementación que promueven el uso de avanzadas tecnologías de la información para el diseño, estudio y análisis de los sistemas viales.

Así, los *Sistemas Inteligentes de Transporte* (de ahora en adelante *SIT*) aparecen como una nueva oleada de herramientas que permiten optimizar, desde diferentes perspectivas de aplicación, el flujo vehicular. En sí, existen *SIT*'s que conjuntan técnicas computacionales con otras disciplinas como lo son, el control estadístico, modelos de predicción, líneas de espera, entre otras. En esta dirección, se han podido apreciar ciertas ventajas al implementar algún *SIT* dentro de una red vial, como lo son:

- Mejorar el rendimiento de la vialidad en volumen de servicio.
- Disminuir los tiempos de espera de los vehículos en una luz roja.
- Decremento, por lo tanto, de la generación de gases.
- Evitar las congestiones abrumadoras en horas pico.

Aunque el futuro de los *SIT*'s es prometedor, el campo de aplicación sigue siendo una visión con una perspectiva futurista. Varias aplicaciones y servicios de los *SIT* actualmente se encuentran trabajando de forma eficaz a lo largo y ancho del mundo, generando una mejora significativa en la seguridad en transporte, la calidad de la movilidad y el nivel de productividad. En este sentido, la amplia y profunda aplicación de los *SIT*'s representa una verdadera revolución en relación al término de la movilidad. Nuevos conceptos, métodos, herramientas y servicios continúan emergiendo en

las áreas de comunicación, información, automatización y electrónica, así, los *SIT* proveen un incremento importante y una plataforma interesante para el campo de la investigación y desarrollo de la Inteligencia Artificial, especialmente aplicando los sistemas inteligentes [2], [4] como herramientas de solución. En esta línea de generación, han aparecido diversos esfuerzos que han permitido evolucionar en la manera de diseñar, simular y analizar las intersecciones viales.

Sin embargo, debido a que las herramientas que actualmente existen presentan algunas carencias, es necesario el surgimiento de nuevos instrumentos que permitan a los analistas de tráfico realizar estudios acerca de los niveles de servicio que una arteria (formando una intersección, ya sea simple o compleja) pudiera presentar y que a la vez sean amigables para el usuario, permitiendo a los *SIT*'s considerar información en tiempo real y trabajar de manera autónoma. Es por este hecho, que surge la necesidad de contar con las herramientas necesarias que permitan a los expertos en control de tráfico, realizar pruebas del mundo real en una herramienta que facilite la integración de múltiples factores y variables del entorno de una vialidad, utilizando métodos, técnicas y modelos fundados y ya bien comprobados en la literatura de control de tráfico. Así, el uso de tecnologías computacionales avanzadas ha surgido como un paradigma de solución en las áreas de los sistemas inteligentes de transporte, monitorizando y optimizando los niveles de servicio del flujo vehicular.

## II. TRABAJOS RELACIONADOS

Todas las ciudades en desarrollo deben contar con un sistema de tránsito que presente un control eficiente en sus sistemas de comunicación por tierra, mar o aire. En este caso, el control y el monitoreo del tráfico es uno de los aspectos claves en áreas metropolitanas debido al incremento constante de los vehículos que circulan. Existen numerosos métodos para reducir los retrasos y disminuir los problemas ambientales causados por vehículos automotores. Actualmente la tecnológica que se utiliza para controlar el tráfico esta basada en microcontroladores y microprocesadores. Estos señalamientos tienen ciertas limitantes ya que ellos no son flexibles a las variantes que se presentan durante un día cualquiera. En los sistemas de control de tránsito la detección de las variables y las situaciones que suceden en una intersección son datos de gran importancia para determinar los tiempos de las luces de un semáforo. De acuerdo con esto, en [7] se presenta una aplicación que utiliza lógica difusa para el control multiagente de un semáforo autónomo basado en sensores inalámbricos los cuales permiten evitar problemas de congestión, accidentes, altas velocidades e irregularidades presentadas en el tráfico. De hecho, este enfoque provee una solución minimizando el tiempo de espera de los vehículos de emergencia utilizando un control difuso bajo situaciones que normalmente ocurren en nuestras vialidades.

Asimismo, en [8] se presenta una nueva infraestructura para establecer un control de velocidad inteligente, el cual esta

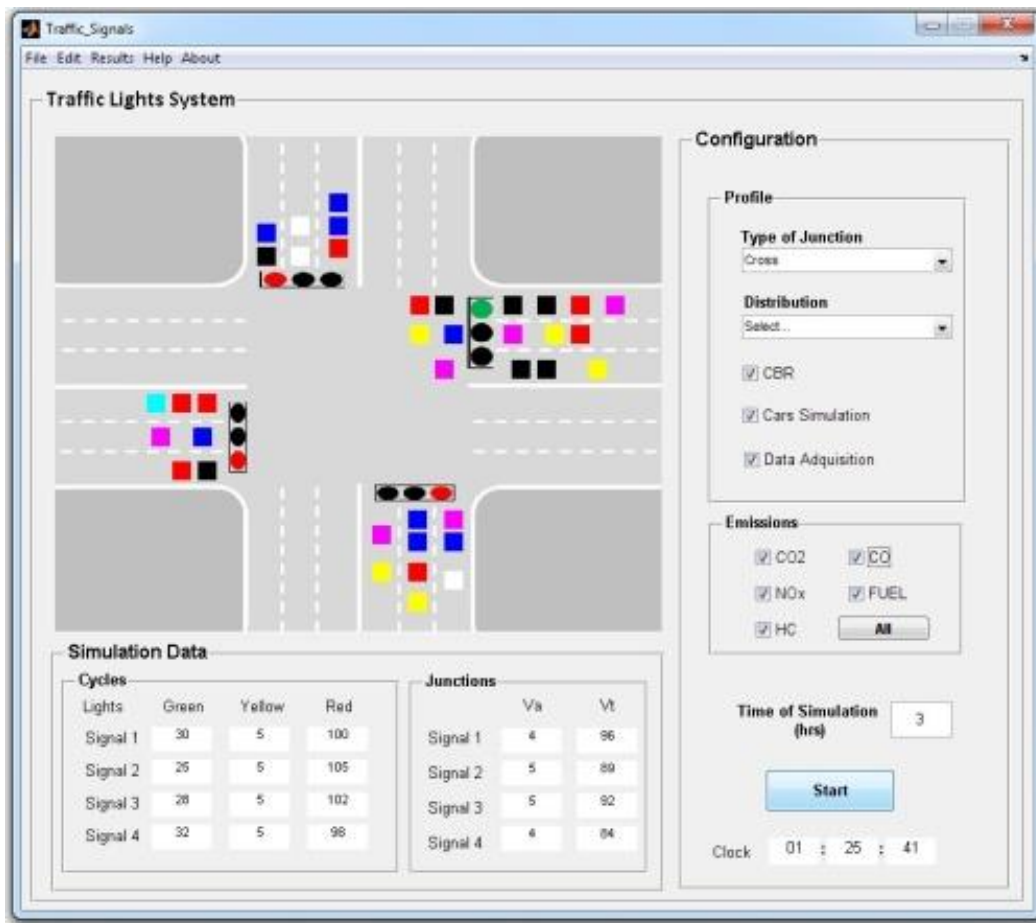


Fig. 1. Instrumento Virtual para la Simulación y Optimización de Arterias (SiSOA)

utiliza tecnología RFID para la identificación de los requerimientos del tráfico. Este sistema tiene una gran precisión para medir la velocidad de los vehículos ya que utiliza un sensor basado en el efecto Hall. Para lograr una adaptación eficiente de la velocidad de los vehículos este enfoque introduce una adaptación para un controlador difuso. Finalmente los resultados sugieren que siempre existirán situaciones indeseables en las vialidades, observando una mejora en la seguridad de los ocupantes de los vehículos bajo el control inteligente de velocidad. Así en [9] se muestra un control de semáforos inteligentes utilizando un controlador FPGA basado en un sistema neuro-difuso. Tal enfoque es capaz de tomar decisiones para reducir los retrasos en una intersección. En particular la teoría de la lógica difusa en el controlador provee respuestas a los intervalos para las luces verdes en función de la dinámica del tráfico usando las variables de entrada en el flujo del tránsito vehicular de la intersección en cuestión y las vecinas.

Además de las tendencias actuales que se han dedicado a acortar la distancia entre el control de tránsito tradicional y los métodos de computación avanzada, el campo de desarrollo de los entornos de simulación para probar y optimizar la movilidad vehicular es otra interesante y prometedora área

para futuros estudios. Hoy en día existen herramientas computacionales que ofrecen la oportunidad de implementar y probar enfoques para corroborar sus ideas. A pesar de esto, dichas herramientas no son funcionales para todas las propuestas.

A la luz de esto, algunos autores tienden a desarrollar sus propios sistemas mientras generan sus propuestas metodológicas. Por ejemplo en [10] se diseñó y evaluó un modelo enfocado a las reservaciones para controlar intersecciones. Este enfoque propone el desarrollo de un nuevo simulador para probar dicha metodología. Ciertamente la herramienta integra un simulador microscópico de tráfico con un simulador de redes y un analizador de emisiones de gases de efecto invernadero. Algunos experimentos son presentados utilizando el desarrollo de dicho simulador para comparar la movilidad vehicular y los beneficios medioambientales de la metodología introducida contra métodos tradicionales. Las referencias [11–20] son otros ejemplos en los cuales los investigadores han requerido crear sus propias herramientas computacionales.

Para finalizar, en [21] se presenta una revisión completa de la literatura acerca de enfoques basados en agentes bien situado en el dominio del tráfico y de los sistemas de

transporte. En particular, dicho artículo revisa aplicaciones clasificándolas en cinco categorías:

- 1) control y administración de tráfico basado en agentes;
- 2) sistemas basados en agentes para transporte en intersecciones;
- 3) sistemas basados en agentes para control de tráfico aéreo;
- 4) sistemas basados en agentes para trenes; y
- 5) sistemas multiagente para modelar y simular el tráfico vehicular.

Sin embargo, los agentes de software y las técnicas de inteligencia artificial aplicadas al tráfico urbano surgen en la última década como una efectiva solución para proveer altos niveles de efectividad en el control de infraestructuras de transporte.

### III. EL ENTORNO PROPUESTO

SiSOA (Sistema inteligente para la Simulación y Optimización de Arterias) es una sofisticada herramienta computacional, diseñada e implementada en lenguaje MatLab, la cual nos permite simular el comportamiento de una intersección vial (ver Fig. 1), a partir de datos estadísticos utilizando la teoría de las líneas de espera, para medir los niveles de servicio de dicha intersección con el principal objetivo de optimizar el flujo vehicular.

Como se ha comentado, SiSOA es una herramienta computacional que conjunta la teoría de las líneas de espera con sistemas inteligentes. De esta manera, se puede considerar que cada semáforo dentro de una intersección será “operado” por un agente inteligente, permitiendo de esta manera, que dichos dispositivos reguladores sean capaces de optimizar, de manera autónoma, el flujo vehicular mediante una adaptación de los tiempos en los ciclos de las cajas semafóricas, evitando así todos los problemas implícitos en la congestión vial. En particular, para realizar el estudio de una intersección en SiSOA se requiere ejecutar tres fases antes de simular el servicio vial en una intersección simple de 4 semáforos.

- 1) Introducir los datos y configuración de la intersección.
- 2) Establecer el tipo de estudio y el tiempo de la simulación.
- 3) Comenzar la simulación y verificar el correcto desarrollo de la simulación.

En particular, se define un *paquete* como un convoy de vehículos de diferentes características que arriba a cualquiera de las vías de una intersección. La ideología de utilizar paquetes de vehículos para establecer la densidad de las llegadas a una intersección, se fundamenta en base a los resultados obtenidos en los aforos realizados, ya que los tiempos entre una llegada y otra en un análisis individual no era del todo representativo para las cuestiones de estudio de SiSOA. De esto modo, en la tabla 1 se definen los paquetes establecidos de acuerdo a las ocurrencias observadas en el estudio.

Para poder demostrar la utilidad de SiSOA en la optimización del nivel de servicio vial en una vialidad, es

TABLA 1.  
PAQUETES Y VEHÍCULOS QUE LO CONSTITUYEN. (S:SEDAN, C:CAMIONETA, P:PÚBLICOS, T:TAXIS, A, PT: AMBULANCIAS, PATRULLAS)

Id	Clasificación de Vehículos					Total
	S	C	P	T	A y/o Pt	
01	6	3	3	2	0	14
02	7	5	2	2	0	16
03	5	5	3	3	1	17
04	6	4	3	3	0	16
05	5	6	1	4	0	16
06	8	6	1	2	0	17
07	4	4	2	3	0	13
08	6	5	3	3	1	18

TABLA 2.  
AFORO DE PAQUETES EN UN SEMÁFORO DE LA VÍA BALM.

HORA	$\mu_L$	$\mu_{MA}$	$\mu_{MI}$	$\mu_J$	$\mu_V$	$\mu_S$	$\mu_D$	$\mu_H$
7-8	93	88	74	81	93	28	5	66
8-9	83	79	81	64	80	20	5	59
9-10	66	67	52	52	58	31	7	48
10-11	67	63	73	58	60	43	26	56
11-12	61	74	71	61	63	30	25	55
12-13	87	77	75	84	71	46	61	72
13-14	108	88	107	88	91	37	55	82
$\mu_D$	81	77	76	70	74	34	26	

necesario efectuar un estudio de las características de la intersección a analizar, por lo tanto, permítanos presentar la estructura geográfica y física de la vialidad, así como los movimientos permitidos para esta zona. En particular, ambas avenidas (Boulevard Adolfo López Mateos y Ejercito Mexicano) son bloques con dos vías de dos carriles cada uno, donde cada una de las vías representa flujo en un solo sentido. Ambas vías presentan 2 tipos de movimientos permitidos, como lo son:

- flujo de vuelta a la izquierda con señalamiento semafórico.
- flujo derecho.

Empíricamente para este estudio, los vehículos que dan vuelta a la derecha, son considerados dentro del conteo de vehículos que van de frente, debido a que dicho servicio de la arteria se puede utilizar en el momento en que el semáforo indica el verde de frente. Para poder generar los datos que se utilizan en el simulador, se realizó un estudio de movimientos en la intersección durante un mes (los 30 días del mes de abril del 2012). Este estudio se efectuó durante una ventana muestral de 7 horas, desde las 7 am hasta las 2 pm. La tabla 2 presenta los datos recolectados y las medias calculadas para uno de los semáforos de la intersección donde:

- $\mu_H$  representa la media calculada por hora.
- $\mu_D$  representa la media calculada por día.

TABLA 3.  
AFORO DE VEHÍCULOS QUE SALEN DE UN SEMÁFORO.

HORA	TIPO DE MOVIMIENTO	$\mu_L$	$\mu_{MA}$	$\mu_{MI}$	$\mu_J$	$\mu_V$	$\mu_S$	$\mu_D$	$\mu_H$
7-8	V. Izq.	35	42	28	42	28	35	35	35
	Frente	273	210	224	287	259	280	266	257
8-9	V. Izq.	28	28	42	28	42	28	42	34
	Frente	287	252	245	217	210	224	252	241
9-10	V. Izq.	35	28	35	35	35	28	35	33
	Frente	217	287	210	273	280	245	252	252
10-11	V. Izq.	28	28	28	35	42	42	42	35
	Frente	252	224	259	273	266	231	266	253
11-12	V. Izq.	28	42	28	28	42	35	28	33
	Frente	294	252	266	224	252	252	217	251
12-13	V. Izq.	35	35	35	35	42	28	28	34
	Frente	259	273	231	238	266	196	238	243
13-14	V. Izq.	28	35	35	42	28	35	28	33
	Frente	224	245	203	252	238	203	217	226
$\mu_D$		145	142	134	144	145	133	139	

Una vez que se tienen definidas la tasa por día, que es el dato que utilizaremos para esta simulación, para cada esquina de llegada a la intersección, ahora se deben definir las tasas de servicio por cada uno de los semáforos. Para este caso, se consideran 4 semáforos y en base a un estudio de observación se pudo calcular el comportamiento del ciclo semafórico de la intersección. Por ejemplo, uno de los semáforos estudiados presenta verde a la izquierda y verde de frente con una duración de 15 segundos y 30 segundos respectivamente. Es necesario aclarar que en el verde de frente se consideran los 15 segundos del verde a la izquierda. Así, la tabla 3 presenta la información obtenida de uno de los semáforos de la intersección.

Ya que están definidos los paquetes y las llegadas de ellos en base a los aforos, se procede a establecer, para cada uno de los semáforos, las tasas de llegada, las tasas de servicio y los tiempos del ciclo semafórico. Para los alcances de esta investigación, únicamente se utilizarán la distribución normal para la inyección de vehículos en el simulador. En este sentido, la tabla 4 muestra la media y la desviación estándar que se obtuvieron a partir de los datos recolectados durante los aforos.

TABLA 4.  
Aforo de Vehículos que salen de un Semáforo.

Datos del Aforo	Caso de Estudio			
	Semáforos			
	1	2	3	4
$\mu$	1.70	1.40	1.50	1.10
$\sigma$	1.05	1.06	1.07	1.09

El funcionamiento inteligente de SiSOA permite que los semáforos interactúen entre ellos de manera autónoma, en base a un control adaptativo, el cual les permite, a los agentes,

intercambiar los tiempos de su ciclo, de acuerdo a los requerimientos y la situación actual de la intersección. Para dejar esto más claro, observe la figura 2 que muestra un esquema general de comunicación entre los semáforos de la intersección para intercambiar tiempo en luz verde.

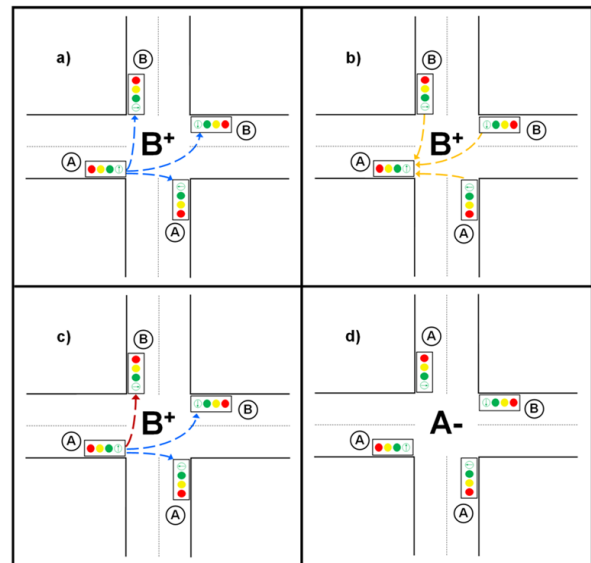


Fig. 2. Esquema General del Proceso de Ajuste del Ciclo Semafórico.

De acuerdo al ejemplo, si un semáforo se percata que en un momento determinado del día el tiempo de su ciclo es muy largo para el nivel de exigencia de la vía, entonces lanza una señal al resto de los semáforos (ver la figura 2a). A su vez, el resto de los semáforos responden su nivel de servicio (de acuerdo a los establecidos por la SCT) al semáforo que ha realizado la oferta (ver la figura 2b). Con esta información, el semáforo que ha realizado la invitación es capaz de decidir

TABLA 5.  
RESULTADOS POR SEMÁFORO Y COMPARACIONES DE LAS TASAS DE RENDIMIENTO.

Semáforo	Días del Mes	# de vehículos atendidos por arteria			RM <sub>caso</sub> = $\left(\frac{RE_{caso} - RE_{comparación}}{RE_{comparación}}\right) * 100\%$		
		RE <sub>Aforo</sub>	SiSOA		RE <sub>Aforo vs RE<sub>Sin</sub></sub>	RE <sub>Aforo vs RE<sub>Con</sub></sub>	RE <sub>Sin vs RE<sub>Con</sub></sub>
			RE <sub>Sin</sub>	RE <sub>Con</sub>			
1	30	15,120	18,553	20,817	22.70	37.67	12.20
2	30	15,212	18,942	21,019	24.52	38.17	10.96
3	30	15,025	18,612	19,972	23.87	32.92	07.30
4	30	15,246	18,103	21,044	18.73	38.02	16.24

(de manera autónoma) cual es el semáforo que requiere más tiempo para su servicio. Ya que ha tomado una decisión, le informa al semáforo en cuestión y al resto de semáforos de la intersección, el tiempo que le cederá y a partir de qué momento lo hará (ver la figura 2c). De esta manera los cuatro semáforos (para este caso en particular) ajustan el tiempo del ciclo semafórico. En tal caso, de manera autónoma los semáforos son capaces de adaptarse a las condiciones y exigencias de la intersección, elevando de esta manera el nivel de servicio de cada una de las arterias, impactando de forma positiva al nivel de servicio promedio de la intersección (ver la figura 2d).

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los datos obtenidos de las simulaciones realizadas, se han generado algunos resultados preliminares, los cuales permiten apreciar de manera significativa las ventajas que ofrece SiSOA al diseñador y evaluador de control de tráfico. En particular la Tabla 5, muestra el número de vehículos que fueron atendidos en cada uno de los puntos de la intersección analizada durante los treinta (30) días del mes de abril del 2012.

En la tabla se resume la información primeramente por el número de vehículos atendidos por cada vía como el Rango de Efectividad (RE) de cada caso. En segundo punto, podemos apreciar una comparación entre cada uno de los rangos de efectividad para conocer el rango de mejora (RM). Con esta información, se puede enfatizar la aportación al número de vehículos atendidos en cada arteria utilizando la herramienta de simulación SiSOA, más allá de establecer la comunicación entre los semáforos. Sin embargo, también podemos apreciar como el establecer una comunicación e interacción colaborativa entre los dispositivos semafóricos incrementa de manera significativa el rendimiento de las arterias estudiadas.

Además, en la figura 3 se puede observar claramente como la comunicación entre los semáforos resulta efectiva al momento de intentar incrementar el nivel de rendimiento en las tasas de servicio de las vialidades, surgiendo esta tecnología como una herramienta eficaz para solucionar los problemas del sistema vial.

Por otra parte, la figura 4a presenta el consumo de combustible y la generación de tres gases contaminantes (Hidrocarburos HC; Monóxido de Carbono CO; Oxido Nitrógeno NOx) en un estudio durante 4 diferentes horas de muestreo (1, 4, 6 12 horas de servicio) analizando unidad de gramo por segundo mientras los vehículos están detenidos en una luz roja en donde se compara la metodología propuesta de control inteligente IC contra el servicio ofrecido por una infraestructura pre-programada de control tradicional TC.

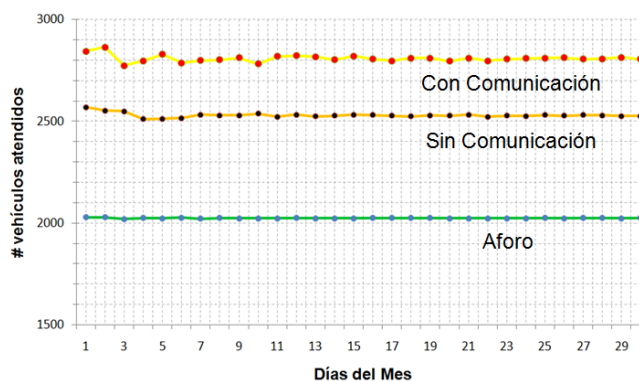


Fig. 3. Resultados preliminares de la Simulación del mes de abril de 2012.

Adicionalmente, la Fig. 4b realiza una comparación de Dióxido de Carbono CO<sub>2</sub> bajo las mismas características que el estudio anterior. Por ejemplo, se puede apreciar en la Fig. 4b la emisión de CO<sub>2</sub> bajo IC muestra un mejor rendimiento que TC en alrededor del 78%.

#### V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

La congestión en los sistemas de vialidad es una de las causas principales en la baja productividad y en el decremento de los estándares de una ciudad moderna. En este sentido, algunos avances recientes en inteligencia artificial sugieren que algunos vehículos de navegación y sistemas de control de tráfico puedan ser manejados por medio de agentes inteligentes en un futuro muy cercano. Debido a que la



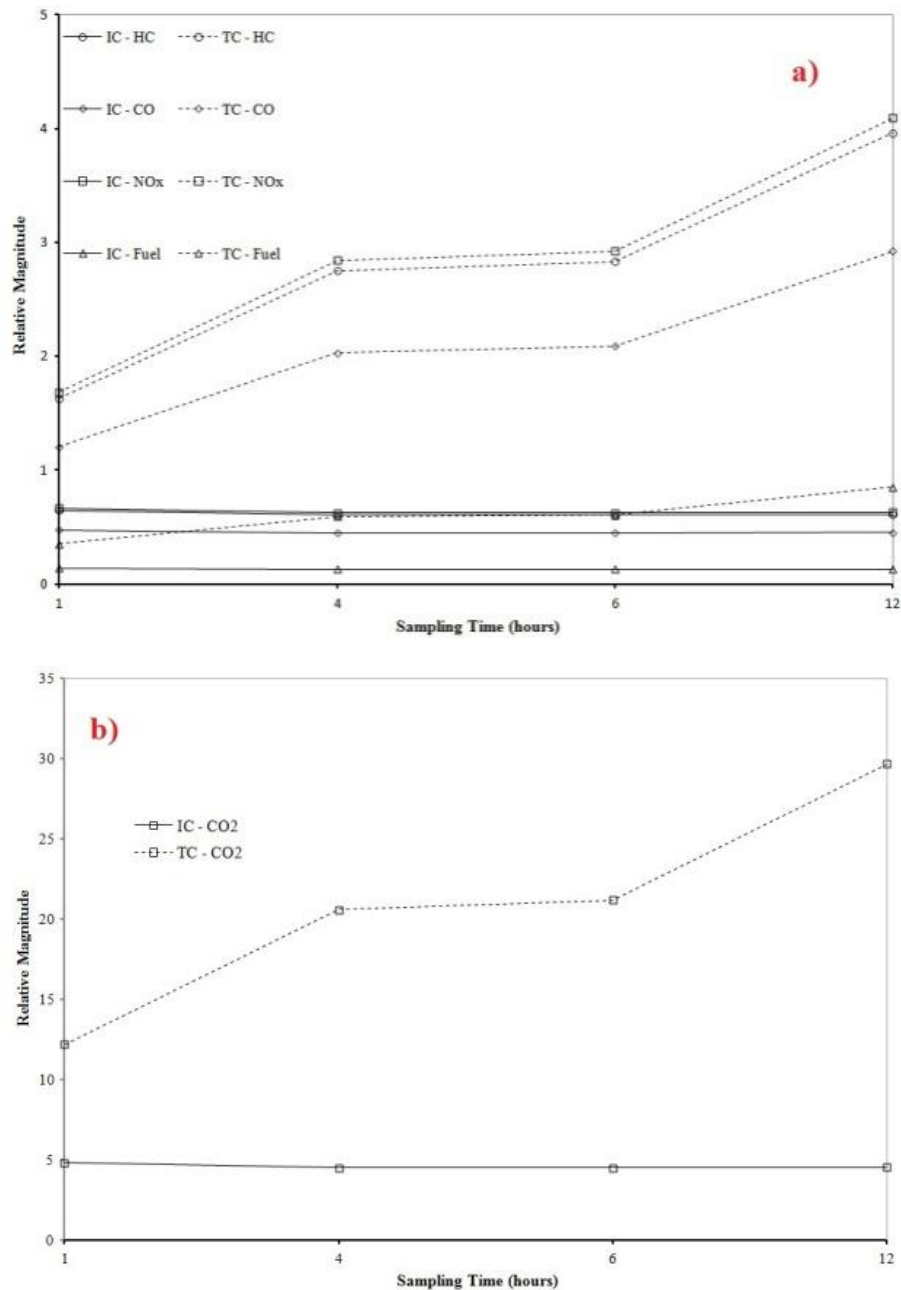


Fig. 4. Magnitud relativa de la emisión de contaminantes y gasto de combustible.

conectividad se vuelve ubicua, el control de tráfico basado en agentes ofrece un enfoque ideal para el manejo de las vialidades, ya que sus características principales de solución de problemas le permiten realizar tareas en áreas geográficamente distribuidas y alternar entre una operación y otra de manera paralela.

Los agentes inteligentes autónomos podrán por lo tanto administrar la información de centros de control de tráfico, caminos, vías de alta velocidad, carreteras, calles, vehículos, casas, oficinas, logrando como resultado una mejora inmediata en el rendimiento de la monitorización de los

sistemas de transporte inteligente. Ellos, podrán utilizar el Internet así como redes ad hoc o inalámbricas, para recolectar información en tiempo real con la principal intención de realizar decisiones más seguras.

En este sentido, el surgimiento de SiSOA no es una idea sin fundamentos teóricos o de aplicación, sino que es un aliciente para continuar avanzando realizando esfuerzos significativos por crear herramientas, técnicas, modelos, etc, que permitan optimizar los niveles del servicio de transporte. SiSOA ofrece un nivel de autonomía total por medio de la cual, cada semáforo es capaz de evaluar sus llegadas y sus salidas, con lo

cual un semáforo puede obtener y calcular sus niveles de servicio vial en tiempo real. Más adelante, cada semáforo utiliza dicha información para auto-evaluarse y definir si puede ofrecer tiempo de su ciclo al resto del grupo de semáforos. Si es así, SiSOA permite una interacción directa entre los semáforos de la intersección, estableciendo una comunicación mediante la cual puede alcanzar acuerdos para intercambiar tiempos de su ciclo.

En sí, tal auto-sincronización permite al experto en control de tráfico ser únicamente un monitor del desempeño de las intersecciones viales. En tal caso, SiSOA ha demostrado ser un sistema computacional altamente sofisticado, que conjunta una de las aplicaciones más poderosas de la inteligencia artificial como lo son los agentes inteligentes con la ya multi-probada teoría de líneas de espera, con el principal objetivo de administrar y optimizar los niveles de movilidad y la generación de gases de efecto invernadero en una intersección vial. Finalmente, se puede argumentar que los sistemas inteligentes son una poderosa tecnología computacional que puede ser utilizada de manera eficaz en diversos campos de aplicación, funcionando en conjunto con otras teorías con el principal objetivo de incrementar el rendimiento de sistemas distribuidos situados en ambientes dinámicos trabajando en tiempo real.

#### AGRADECIMIENTOS

Este artículo ha sido realizado gracias al apoyo otorgado por el Fondo Mixto del Gobierno del Estado de Tamaulipas y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) bajo el proyecto TAMPS-2011-C35-186242.

#### REFERENCIAS

- [1] N. A. Chaudhary, Chi-Leung Chu, *Software for Timing Signalized Arterials*, Research Report 4020-1, Texas Transportation Institute, College Station, Texas, September, 2002.
- [2] K. Dresner, P. Stone, *A Multiagent Approach to Autonomous Intersection Management*, 2008.
- [3] Nicholas J. Garber, Lester A. Hoel, *Traffic and Highway Engineering*, West Publishing Company, St. Paul, Mn, 1988.
- [4] Y. Hu, P. Thomas, J. Stonier Russel, "Traffic signal control using fuzzy logic and evolutionary algorithms," *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp.1785–1792, 2007.
- [5] K. A. S. Al-Khateeb, J. A. Y. Johari, W. F. Al-Khateeb, "Dynamic Traffic Light Sequence Algorithm Using RFID," *Journal of Computer Science*, vol. 4, no. 7, pp. 517–524, 2008.
- [6] W. Wen, "A dynamic and automatic traffic light control system for solving the road congestion problem," *Expert Systems with Applications*, vol. 34, no. 4, pp. 2370–2381, 2008.
- [7] Y. Saeed, M. Saleem Khan, K. Ahmed, A. Salam Mubashar, "A Multi-Agent Based Autonomous Traffic Lights Control System Using Fuzzy Control," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 2, no. 6, 2011.
- [8] J. Pérez, F. Seco, V. Milanés, A. Jiménez, J. C. Díaz and T. de Pedro, "An RFID-Based Intelligent Vehicle Speed Controller Using Active Traffic Signals," *Sensors*, vol. 10, 2010.
- [9] A. R. Zade, D. R. Dandekar, "FPGA Implementation of Intelligent Traffic Signal Controller Based On Neuro-Fuzzy System", *International Conference on Advanced Computing, Communication and Networks*, , Maharashtra, India, 2011.
- [10] S. Huang, A. W. Sadek, Y. Zhao, "Assessing the Mobility and Environmental Benefits of Reservation-Based Intelligent Intersections Using an Integrated Simulator," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 13, no. 3, 2012.
- [11] R. S. Chen, D. K. Chen, S. Y. Lin, "ACTAM: Cooperative multiagent system architecture for urban traffic signal control," *IEICE Trans. Inf. Syst.*, vol. E88-D, no. 1, pp. 119–126, 2005.
- [12] B. Chen, H. H. Cheng, J. Palen, "Mobile-C: A mobile agent platform formobile C/C++ agents," *Softw. Pract. Exp.*, vol. 36, no. 15, pp. 1711–1733, 2006.
- [13] Mobile-C. [Online]. Available: www.mobilec.org.
- [14] A. M. Garcia-Serrano, D. Teruel Vioque, F. Carbone, V. D. Mendez, "FIPA-compliant MAS development for road traffic management with a knowledge-based approach: The TRACK-R agents," in *Proc. Challenges Open Agent Syst. Workshop*, Melbourne, Australia, 2003.
- [15] J. Z. Hernandez, S. Ossowski, A. Garcia-Serrano, "Multiagent architectures for intelligent traffic management systems," *Transp. Res. Part C: Emerging Technol.*, vol. 10, no. 5/6, pp. 473–506, 2002.
- [16] R. T. Van Katwijk, P. Van Koningsbruggen, B. De Schutter, J. Hellendoorn, "Test bed for multiagent control systems in road traffic management," *Transp. Res. Rec.*, vol. 1910, pp. 108–115, 2005.
- [17] Z. Q. Liu, T. Ishida, H. Y. Sheng, "Multiagent-based demand bus simulation for Shanghai," in *Proc. Massively Multi-Agent Syst. I*, vol. 3446, pp. 309–322, 2005.
- [18] F. Y. Wang, "Agent-based control for networked traffic management systems," *IEEE Intell. Syst.*, vol. 20, no. 5, pp. 92–96, 2005.
- [19] F. Y. Wang, "Toward a revolution in transportation operations: AI for complex systems," *IEEE Intell. Syst.*, vol. 23, no. 6, pp. 8–13, 2008.
- [20] H. S. Zhang, Y. Zhang, Z. H. Li, D. C. Hu, "Spatial-temporal traffic data analysis based on global data management using MAS," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 5, no. 4, pp. 267–275, 2004.
- [21] Bo Chen, Harry H. Cheng, "A Review of the Applications of Agent Technology in Traffic and Transportation Systems," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 11, no. 2, 2010.